



## Estimating Spatial Distribution of Rainfall by Fuzzy Set Theory

S. Rahimi Bondarabadi<sup>1</sup> and B. Saghafian<sup>2</sup>

### Abstract

One of the important inputs for a water resources study is rainfall. Choosing improper interpolation methods may result in extensive errors. Geostatistical methods may also fail to be used, in case of insufficient data. However, generated data has small errors that produce unequivalency in data. Using fuzzy set theory, every data (observed, generated value and obtained from an expert or imprecise) valuated by membership function. Kriging, Weighted Moving Average (WMA), Thin Plate Smoothing Splines (TPSS) and Fuzzy Kriging Interpolation is executed for annual rainfall in eastern and southeastern Iran. Two cases were studied. The first case generated the data for some of the points and fuzzified these points. In the second case, the number of the generated points are increased. Variogram analysis demonstrated spatial correlation between the runoff and the annual rainfall in the study area. Also, fuzzy variogram showed spatial correlation with larger ranges. The results show that the fuzzy kriging method is an accurate method in estimating monthly and annual rainfall. Increasing the number of generating points would however increase the estimating error.

**Keywords:** Cluster analysis, Geostatistics, Annual rainfall, Fuzzy set theory, Fuzzy kriging.

## برآورد توزیع مکانی بارندگی با کمک تئوری مجموعه‌های فازی

سیما رحیمی بندرآبادی<sup>۱</sup> و بهرام ثقفیان<sup>۲</sup>

### چکیده

با توجه به اهمیت بارندگی در مطالعات منابع آب و هیدرولوژی، ضعف در تعیین تغییرات مکانی بارندگی می‌تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در نتیجه‌گیری مطالعات باشد. روشهای زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن همبستگی مکانی داده‌ها معمولاً دقت مناسبی را ارائه می‌نمایند. کافی نبودن داده‌ها کاربرد روشهای زمین آماری برای برآورد توزیع مکانی بارندگی را محدود می‌نماید. استفاده از داده‌های تولید شده (کارشناسی) که خود دارای درصدی خطا هستند، دارای عدم هم ارزی با داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی، که توانایی استفاده از داده‌های تخمینی و اعداد تولید شده را دارد، می‌تواند در برآورد مناسب‌تر بارندگی کمک نماید. در این مطالعه قابلیت روش فازی کریگینگ ارزیابی و سپس با روشهای کریگینگ معمولی، کوکریگینگ و TPSS<sup>۱</sup> برای برآورد بارندگی سالانه مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور از دو حالت داده استفاده گردید. در حالت اول تعدادی نقطه کمکی با توجه به توزیع واریانس خطا، انتخاب و این نقاط فازی گردید، در حالت دوم تعداد نقاط کمکی افزایش داده شد. نتایج بررسی روشها نشان داد که برای برآورد بارندگی سالانه استفاده از روش فازی کریگینگ در هر دو حالت و همچنین در برونیابی داده‌ها بهتر از سایر روشها عمل می‌نماید. ضمن آنکه با افزایش تعداد نقاط کمکی مقدار خطای برآورد افزایش می‌یابد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که تقسیم منطقه به واحدهای همگن، با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای، داده‌های بارندگی را ایستا می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** تحلیل خوشه‌ای، زمین آمار، بارندگی سالانه، تئوری مجموعه فازی، فازی کریگینگ.

1- Scientific staff, soil conservation and watershed management research institute. Email: rahimi\_si@scwmri.ac.ir  
2- Assistant Professor, soil conservation and watershed management research institute

۱- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب‌خیزداری.

۲- استادیار مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب‌خیزداری

## ۱- مقدمه

برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه را بر روی بارندگی جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که در مجموع روش TPSS مناسب تر می‌باشد. ولی با توجه به نزدیک بودن نتایج برخی معیارهای مقایسه، انتخاب روش مناسب به هدف، دقت و زمان محاسبه وابسته گردید.

از طرف دیگر، Vega (2000) پتانسیل کاربرد قوانین فازی در زمین آمار را مورد بررسی قرار داد. وی روش Indicator Kriging را با روش فازی مورد بررسی و مقایسه قرار داد و به این نتیجه رسید که روشهای زمین آماری قابلیت ترکیب با تئوری فازی را دارند و توصیه نمود که در تحقیقات به این مسئله توجه گردد. Bardossy et al. (1989) روش کریجینگ با نیم تغییرنا فازی را معرفی نمودند. آنها روش استفاده از داده‌های فازی و محاسبات مربوط به نیم تغییرنا با استفاده از اعداد فازی را بیان نمودند. (Bartels (1997 در پایان نامه خود تئوری ارائه شده توسط Bardossy و همکاران (۱۹۸۹) را به صورت یک نرم افزار (FUZZEK) ارائه نموده است. در این نرم افزار علاوه بر امکان انجام روش فازی کریجینگ برای برآورد توزیع مکانی متغیرها می‌توان با ترکیب پارامترهای مختلف، با استفاده از فازی سازی داده‌ها و ایجاد یک مقیاس مشترک برای آنها، به ارزیابی یک متغیر پرداخت. (Bandemer & Gebhardt (2000 روش Bayesian Fuzzy Kriging را معرفی نمودند. آنها با استفاده از تئوری و قانون بیز معادلات کریجینگ را اصلاح نمودند. (Hung et al. (1998 از استدلال فازی و الگوریتم ژنتیک برای برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه در سوئیس استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که این روش برای تخمین مقادیر حد بارندگی مناسب نمی‌باشد. ضمن آنکه این روش معمولاً به مقدار زیادی داده برای تعریف سیستم احتیاج دارد. (Gallo et al. (1998 نیز برای برآورد بارندگی از روش fuzzy  $\beta$ -splines استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که این روش می‌تواند تقریب خوبی از بارندگی حتی زمانی که تعداد داده‌های در دسترس اندک می‌باشد، ارائه بدهد. البته هر قدر تعداد داده‌ها افزایش یابد، دقت مدل نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات انجام شده به نظر می‌رسد که با کمک تئوری مجموعه فازی که امکان استفاده از داده‌های کارشناسی شده را فراهم می‌سازد، بتوان نتایج روش‌های زمین آماری را (در مواردی که تراکم داده‌ها کم بوده و یا نیاز به برنویابی داده‌ها می‌باشد) بهبود بخشید. لذا در این مطالعه کارآیی روش فازی کریجینگ در برآورد بارندگی سالانه مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران ارزیابی و سپس این روش با روش TPSS، روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ مورد مقایسه قرار گرفته است.

داده‌های بارندگی در بسیاری از تحلیل‌های هیدرولوژیکی و طراحی‌ها از اهمیت زیادی برخوردار هستند. ضمن اینکه در اغلب این مطالعات لازم است توزیع مکانی بارندگی با دقت مناسبی برآورد گردد. روش‌های زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن موقعیت و آرایش داده‌ها و همچنین همبستگی مکانی آنها معمولاً دقت مناسبی را ارائه میکنند. اما به طور کلی داده‌های بارندگی در دسترس، غیرهمگن و یا دارای عدم قطعیت و اطمینان می‌باشند. ضمن اینکه پراکنش آنها نیز نامناسب می‌باشد و در بیشتر مناطق تعداد آنها کم می‌باشد که باعث محدودیت در استفاده از روشهای زمین آماری می‌گردد. معمولاً برای مقابله با این مشکل از داده‌های کارشناسی شده استفاده می‌گردد. این داده‌ها دارای درصدی خطا بوده و با داده‌های مشاهده‌ای هم ارزش نمی‌باشند. بنابراین در مناطق کم آمار، نقشه‌های همبازار دارای عدم قطعیت تعریف نشده می‌باشند. یکی از راه‌های ممکن برای استفاده از نظرات کارشناسی و داده‌های تولید شده با روشهای موجود دیگر، استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی می‌باشد. فازی کریجینگ در واقع اصلاح شده روش معمولی کریجینگ است. این روش از داده‌های اندازه‌گیری شده دقیق (داده‌های دارای درجه عضویت ۱) به همراه تخمینهای غیر دقیق، که به عنوان اعداد فازی معرفی شده‌اند، استفاده می‌کند.

در زمینه روشهای زمین آمار در برآورد بارندگی، (Goovaerts (2000 روشهای کریجینگ ساده، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ را برای برآورد بارندگی سالانه و دمای ۳۶ ایستگاه کلیماتولوژی در ناحیه‌ای 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. محققین از روش Spline با حالت‌های Tension و Smooth برای برآورد بارندگی در سوئیس استفاده کردند. برآوردها با استفاده از متغیر کمی ارتفاع و بدون آن انجام شد که هر دو نتایج مشابهی ارائه کردند. مهدوی و همکاران (۱۳۸۳) کاربرد روشهای زمین آماری را در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد برای برآورد بارندگی ماهانه و سالانه روش TPSS با توان ۲ و با متغیر کمی ارتفاع روش مناسبی می‌باشد. رحیمی و مهدیان (۱۳۸۳) نیز بررسی‌هایی را در رابطه با توزیع مکانی بارندگی روزانه و ماهانه در حوزه دریای خزر بعمل آوردند. نتایج آنها بیانگر ارجحیت روش TPSS برای هر دو مقیاس روزانه و ماهانه بود. ثقفیان و همکاران (۱۳۸۳) اثر تراکم ایستگاه و تفکیک منطقه‌ای در

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر شامل حوضه مرکزی و قسمت‌هایی از حوضه آبریز شرقی و جنوب شرقی ایران می‌باشد (شکل ۱). این منطقه به طور کلی دارای دو اقلیم خشک و بیابانی و فراخشک بیابانی می‌باشد. از لحاظ جبهه‌های باران زای ورودی به منطقه، به علت قرار گرفتن ارتفاعات زاگرس و البرز در اطراف، این منطقه در بادپناهی قرار دارد و مقدار بارندگی در آن کم می‌باشد. منطقه مورد نظر دارای دامنه تغییرات ارتفاعی زیادی بوده به طوری که بیشترین ارتفاع ۴۰۰۰ متر و کمترین آن صفر می‌باشد (شکل ۱). به دلیل وجود بیابان‌های خشک و سوزان، پراکندگی ایستگاهها در این منطقه نامنظم و اکثر ایستگاهها دارای آمار ناقص و مشکوک می‌باشند. تعداد ایستگاههای موجود در منطقه ۱۸۴ ایستگاه می‌باشد که از این تعداد، ۵۰ ایستگاه دارای آمار کمتر از ۱۰ سال بوده، و برخی ایستگاهها نیز دارای آمار بسیار ناقص و غیر قابل اعتماد می‌باشند. نهایتاً پس از بررسی و در نظر گرفتن مسائل فوق تعداد ۱۲۰ ایستگاه دارای آمار بارندگی با طول دوره ۳۰ سال جهت انجام مطالعات، انتخاب گردید. لازم به ذکر است که به دلیل وسعت منطقه و همگن نبودن بارندگی در کل منطقه، با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای، منطقه به سه واحد همگن (A، B و C) تقسیم گردید که شرح بیشتر آن در قسمت بحث و نتایج ارائه می‌گردد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ نیز مشخص است منطقه A بیشترین وسعت را داشته و دارای اقلیم خشک و فراخشک می‌باشد. در این منطقه تعداد ۵۷ ایستگاه وجود دارد. منطقه B تقریباً کوهستانی بوده، به طوری که حداکثر ارتفاع حدود ۳۳۰۰ متر و حداقل آن ۱۵۰ می‌باشد. این در حالیست که ارتفاع ایستگاههای (تعداد ۲۵ ایستگاه) موجود در منطقه بین ۵۰۰ تا ۲۸۰۰ متر قرار دارد که نیاز به برونیابی بارندگی در ۶۰ درصد سطح این منطقه وجود دارد. در منطقه C تغییرات ارتفاع بین ۸۸۰ تا ۳۰۵۰ متر باشد. در این منطقه تعداد ۲۸ ایستگاه موجود می‌باشد که ارتفاعی بین ۸۳۰ تا ۲۵۰۰ دارند.

### ۲-۲- روش‌های میانابایی

در این تحقیق روش فازی کریگینگ با روش‌های کریگینگ معمولی و کوکریگینگ و TPSS برای برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه مورد مقایسه قرار گرفته است. تئوری روش‌های کریگینگ معمولی،

کوکریگینگ و TPSS در منابع مختلف ارائه شده است. به عنوان نمونه در مطالعات انجام گرفته توسط (Hutchinson et al. 1994)، (Watson 1984) و در کتاب (Issaks and Srivastava 1989) راجع به این روشها توضیحاتی ارائه گردیده است. در اینجا تنها به شرح مختصری از روش فازی کریگینگ پرداخته می‌شود. اختلاف روش کریگینگ و فازی کریگینگ در اینست که فازی کریگینگ قادر به استفاده از داده‌های غیردقیق<sup>۲</sup> می‌باشد و این ایهام به وسیله اعداد فازی بیان می‌شود. بنابراین زمانی که تعداد داده‌های در دسترس برای روش کریگینگ کم باشد، می‌توان با استفاده از داده‌های غیردقیق که از تجربه و نظر کارشناسی بدست می‌آیند، استفاده نمود. به طور کلی برای فازی نمودن روش کریگینگ دو راه موجود می‌باشد. یکی از آنها استفاده از عملیات فازی در حل معادلات روش کریگینگ می‌باشد. روش دیگر اینست که اصول اساسی به کار رفته در این روش مانند حداقل سازی خطا، نارایی، ایستایی و غیره به صورت فازی بیان گردد (Bandemer and Gebhardt, 2000).

در این مطالعه برای فازی نمودن روش کریگینگ از روش اول (استفاده از عملیات فازی در حل معادلات کریگینگ) استفاده گردید. برای فازی سازی داده‌ها نیز از تابع عضویت مثلثی استفاده گردید. پس از تبدیل اعداد، نیاز به آنالیز نیم تغییرنا<sup>۳</sup> می‌باشد. برای محاسبه نیم تغییرنا فازی باید معادله (۱) با اعداد فازی شده و با کمک اصل توسیع<sup>۴</sup> محاسبه گردد.

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

که در آن :

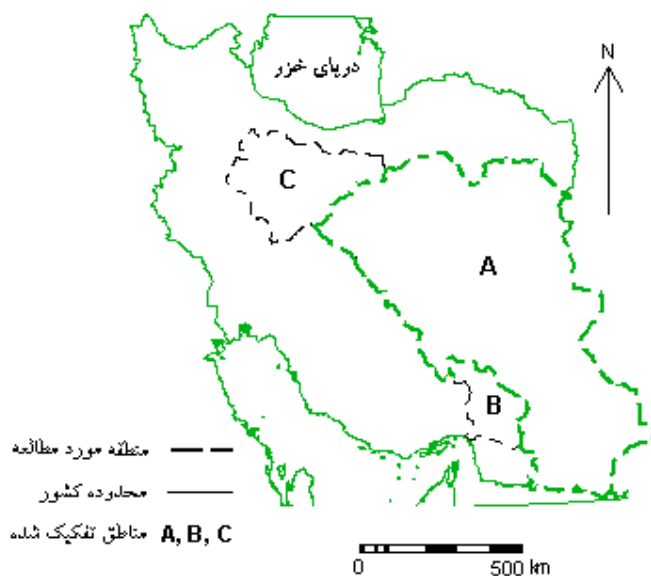
$\gamma(h)$  : مقدار نیم تغییرنا برای جفت نقاطی که به فاصله  $h$  از هم قرار دارند،

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

$z(x_i)$  : مقدار مشاهده شده متغیر  $x$  در محل  $i$

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

با استفاده از  $\alpha$  برش<sup>۵</sup>، یک بازه  $[a, b]$  برای هر عدد فازی بدست می‌آید که محاسبات نیم تغییرنا بر روی این بازه‌ها صورت خواهد گرفت. در زیر نحوه محاسبه معادلات جایگزین شده برای نیم تغییرنا فازی با استفاده از اصل توسیع و بر روی  $\alpha$  برش‌ها ارائه شده است :



شکل ۱- محدوده منطقه مورد مطالعه

$$\bar{\gamma}(h, [a_1, b_1], \dots, [a_2, b_2]) \approx [a, b]$$

with

$$a \equiv \frac{1}{2N(h)} \sum_{\substack{\text{input coordinate } x_i, x_j \\ \text{also } x_i - x_j = h}} \begin{cases} (b_i - a_j)^2 & \text{If } b_i - a_j \leq 0 \\ 0 & \text{If } a_i - b_j < 0 < b_i - a_j \\ (a_i - b_j)^2 & \text{If } 0 \leq a_i - b_i \end{cases} \quad (2)$$

$$b \equiv \frac{1}{2N(h)} \sum_{\substack{\text{input coordinate } x_i, x_j \\ \text{also } x_i - x_j = h}} \begin{cases} (a_i - b_j)^2 & \text{If } b_i - a_j \leq 0 \\ \max((a_i - b_j)^2, (b_i - a_j)^2) & \text{If } a_i - b_j < 0 < b_i - a_j \\ (b_i - a_j)^2 & \text{If } 0 \leq a_i - b_j \end{cases}$$

$$\hat{z}^*(x, [a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n]) = [a, b]$$

with

$$a \equiv \sum_{i=1}^n \begin{cases} \lambda_i(x).a_i & \text{If } \lambda_i(x) \geq 0 \\ \lambda_i(x).b_i & \text{If } \lambda_i(x) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$b \equiv \sum_{i=1}^n \begin{cases} \lambda_i(x).b_i & \text{If } \lambda_i(x) \geq 0 \\ \lambda_i(x).a_i & \text{If } \lambda_i(x) < 0 \end{cases}$$

پس از محاسبه نیم تغییرنا فازی، یک مدل نیم تغییرنا فازی تئوری به مقادیر برازش داده می‌شود. مدل نیم تغییرنا فازی تئوری Crisp خواهد بود. فازی کریگینگ بسط تابع کریگینگ معمولی یعنی تابع  $K(\gamma, x, z)$  با استفاده از اصل توسیع و فقط در مورد مقادیر متغیر  $z$  با استفاده از اصل توسیع و فقط در مورد  $\gamma(x)$  قبلا محاسبات فازی انجام گرفته است که در مدل نیم تغییرنا منعکس می‌گردد. بنابراین اگر اعداد فازی تعریف شده برای هر مقدار متغیر به صورت  $[a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n]$  مشخص شود، خواهیم داشت:

به طوریکه،  $\hat{z}^*(x, [a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n]) = [a, b]$  معرف مقدار برآوردی با روش فازی کریگینگ می‌باشد (Bardossy, 1997; Bartels, 1997).

### ۳-۲- روش و معیارهای ارزیابی

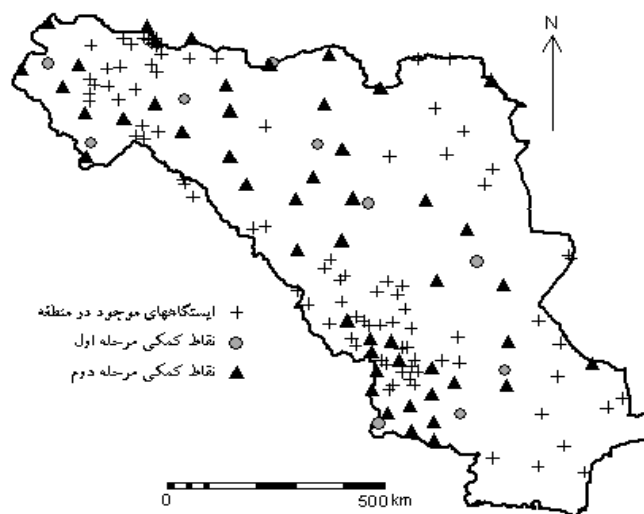
برای ارزیابی میزان دقت و انتخاب بهترین روش، در این مقاله از روش اعتبار سنجی تقاطعی<sup>۶</sup> و معیارهای دقت<sup>۷</sup> (MAE) و انحراف<sup>۸</sup> (MBE) استفاده شده است. نحوه انجام این روش و معیارها در منابع مختلفی از جمله (Willmott, 1982) و رحیمی و مهدیان (۱۳۸۳) ارائه شده است. انتخاب مناسبترین روش در مرحله اول بر مبنای کمترین مقدار MAE و MBE و در مرحله دوم، بر مبنای تطابق تغییرات بارندگی با وضعیت منطقه می‌باشد.

### ۳-۳- مراحل کار و نتایج

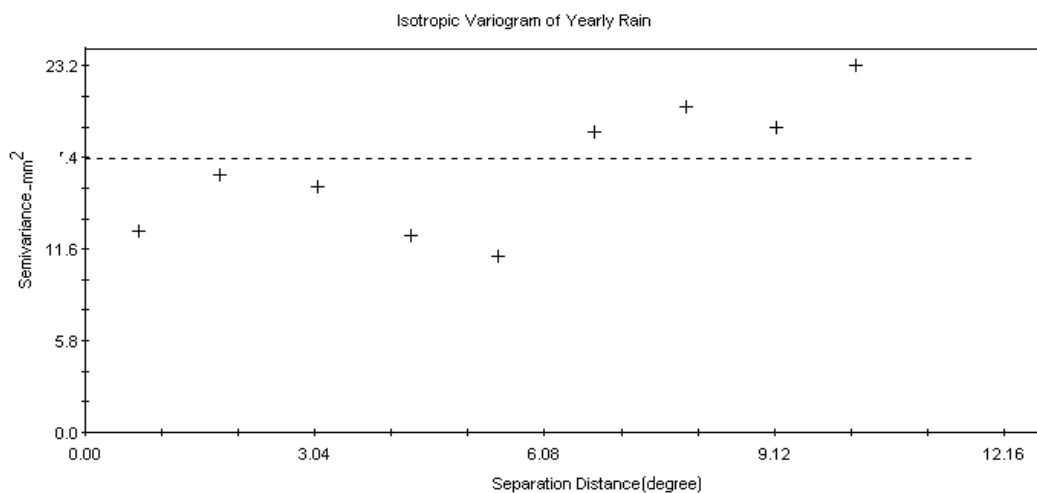
#### ۳-۱- نتایج ارزیابی درونیابی بارندگی

به منظور بررسی کاربرد تئوری مجموعه فازی در برآورد مکانی بارندگی سالانه و ماهانه، ۲ حالت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، به دلیل ناکافی بودن تعداد داده‌ها، چند نقطه کمکی با استفاده از توزیع پراش (واریانس) خطای روش کریگینگ و در محل‌های حداکثر خطا، انتخاب شده و به داده‌ها اضافه گردید. در حالت دوم باتوجه به اینکه هنوز درصد زیادی از سطح منطقه فاقد داده مشاهده‌ای بوده و تراکم داده‌ها کم بود، تعداد دیگری نقطه به داده‌های حالت اول اضافه گردید. انتخاب نقاط کمکی در این مرحله بر اساس ارتفاع و در نقاط مرتفع منطقه که فاقد ایستگاه بود، صورت گرفت. مقادیر بارندگی برای این نقاط از روش وایازی (رگرسیون)

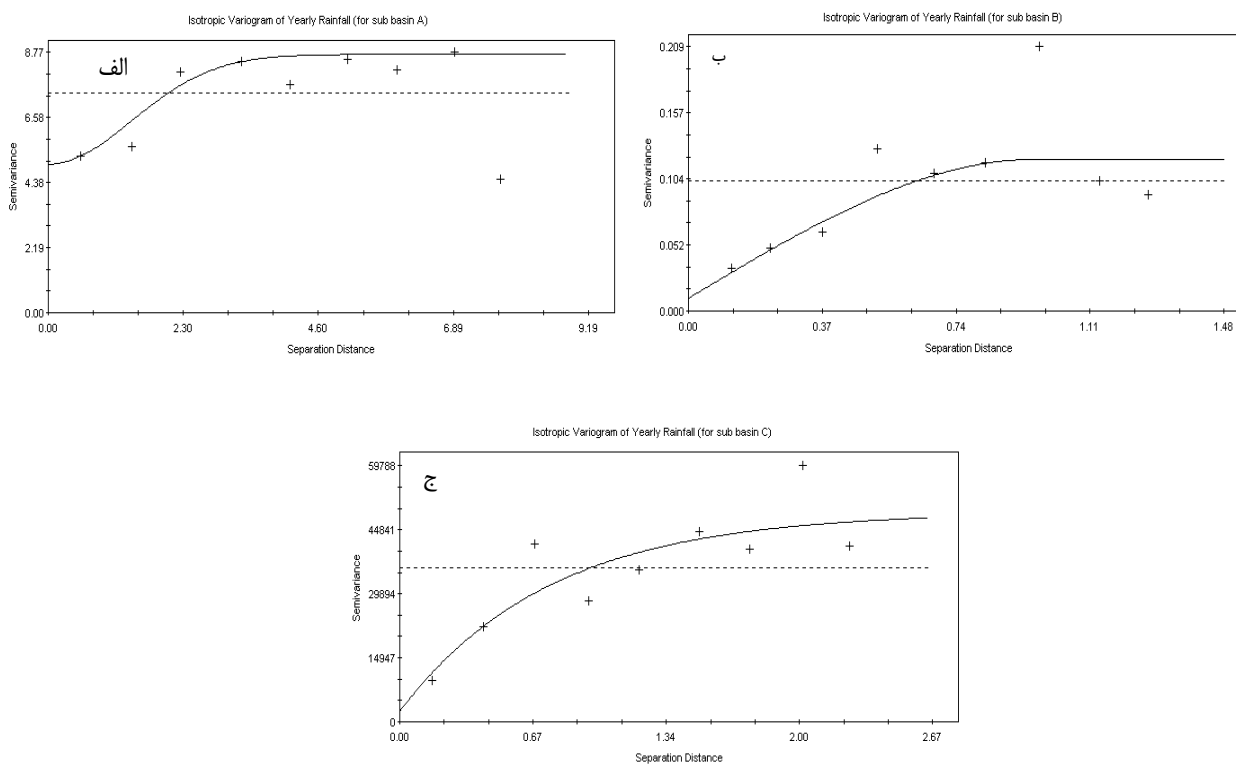
چند متغیره (طول، عرض و ارتفاع) برآورد و مقادیر بارندگی در این نقاط به صورت فازی تعریف گردید. شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های موجود در منطقه و نقاط کمکی در هر مرحله را نشان می‌دهد. بررسی اولیه تغییرنا بارندگی سالانه با کمک نرم افزار GS+، در کل منطقه (شکل ۲) نشان می‌دهد که داده‌ها ایستایی لازم را ندارد. بنابراین برای استفاده از روشهای زمین آماری لازم است که داده‌ها را ایستا نمود. یکی از روشهای ایستا نمودن متغیرهای منطقه‌ای تقسیم منطقه به واحدهای همگن می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به مناطق همگن و ایستا، داده‌های بارندگی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی<sup>۹</sup> (Alhamed et al. 2002) و با کمک متغیرهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاهها به ۳ دسته تقسیم گردیدند. برای آزمون صحت گروه بندی نیز از روش تحلیل تابع تشخیص<sup>۱۰</sup> (Stockburger et al. 1998) استفاده گردید که صحت گروهها با چند مورد جابجایی نقاط مرزی تأیید گردید (شکل ۱). بررسی مجدد تغییرنا در هر یک از واحدهای همگن نشان می‌دهد که ایستایی در این مناطق برقرار باشد (شکل ۴). بنابراین، کلیه بررسی‌ها به صورت مجزا در هر یک از این مناطق صورت خواهد گرفت. مشخصات نیم تغییرنا بارندگی سالانه در هر سه منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به نقش ارتفاع در بارندگی و همبستگی بین این دو پارامتر، تغییرنا مقابل بارندگی و ارتفاع نیز محاسبه و رسم گردید. همانطور که در جدول (۱) مشخص است، منطقه C فاقد همبستگی مکانی ارتفاع و بارندگی به دلیل نبودن همبستگی مکانی بین ارتفاع ایستگاهها (با توجه به نیم تغییرنا ارتفاع منطقه) می‌باشد.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های منطقه و نقاط کمکی در هر یک از مراحل



شکل ۳- تغییرنا بارندگی سالانه در کل منطقه مورد مطالعه (بدون تفکیک مناطق همگن).



شکل ۴- تغییرنا بارندگی سالانه در هر یک از مناطق تفکیک شده (الف: منطقه A، ب: منطقه B، ج: منطقه C).

مکانی متقابل بارندگی و ارتفاع دارای روند منفی می‌باشد ولی شعاع همبستگی با استفاده از ارتفاع افزایش یافته است. در مرحله بعد آنالیز نیم تغییرنمای فازی (با استفاده از نرم افزار FUZZEK) برای هر دو حالت داده، انجام شد (جدول ۱). مقایسه تغییرنا معمولی و فازی

در منطقه A نیز تغییرنا دارای روند منفی می‌باشد که به دلیل ضعیف بودن رابطه داده‌های بارندگی و ارتفاع در این منطقه می‌باشد (ضریب همبستگی بارندگی و ارتفاع در منطقه A برابر ۰/۱۴ می‌باشد). لازم به ذکر است که در این منطقه هرچند همبستگی

برای حالت اول، نشان می‌دهد که مقدار شعاع همبستگی با استفاده از اعداد فازی افزایش یافته است (تقریباً ۳ برابر). شکل (۵) نیم تغییرنا فازی بارندگی سالانه داده‌های حالت اول را در هر یک از مناطق نشان می‌دهد.

MAE و MBE می‌باشد. لذا برای استفاده از این روش از توان ۲ استفاده خواهد شد.

جدول (۲) مقادیر MAE و MBE روشهای مختلف مورد بررسی در هر یک از مناطق A، B و C را نشان می‌دهد. در منطقه A و C روش فازی کریگینگ دارای کمترین مقدار MAE و MBE می‌باشند. در منطقه B روش فازی کریگینگ دارای کمترین مقدار MBE (مقدار MBE برابر ۲۵/۶ و مقدار MAE برابر ۶۰/۳) و روش TPSS دارای کمترین مقدار MAE (۵۵/۲) و مقدار MBE برابر ۳۰/۲ می‌باشد. مقایسه تفاوت این دو مقدار در این دو روش و بررسی درصد این مقادیر نسبت به میانگین داده‌ها، نشان می‌دهد که در مجموع روش فازی کریگینگ دارای خطای کمتری می‌باشد. لازم به ذکر است که به جز روش فازی کریگینگ بقیه روشها بدون نقاط کمکی و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آنها در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که در جدول (۳) نیز مشخص است در منطقه A و C روش کریگینگ به طور نسبی، نسبت به بقیه روشها درصد خطای کمتری دارد. در منطقه B روش رگرسیون دقت بیشتری ارائه می‌کند. مقایسه جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که خطای برآورد روشهای کریگینگ، کوکریگینگ و TPSS در این حالت (بدون استفاده از نقاط کمکی) به طور متوسط کاهش یافته است. لذا استفاده از نقاط کمکی در این روشها می‌تواند باعث افزایش خطا در این روشها گردد.

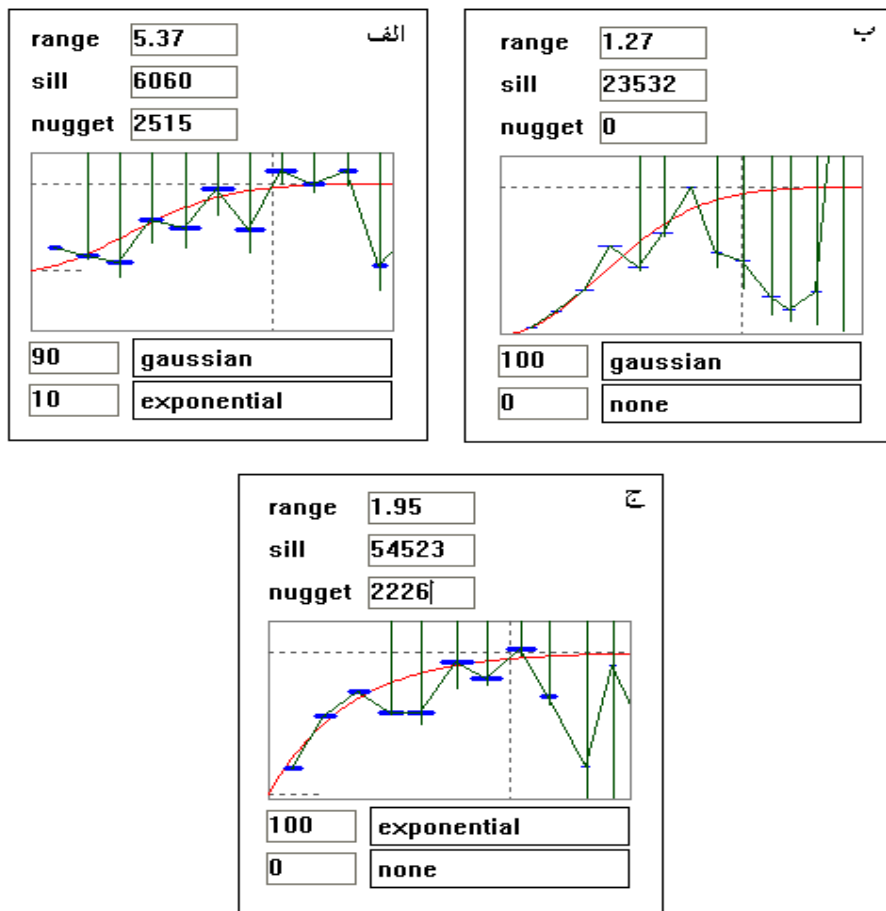
از آنجائیکه به نظر می‌رسد استفاده از نقاط کمکی حالت اول کافی نباشد و برای بررسی اینکه آیا محدودیتی در استفاده از تعداد نقاط کمکی وجود دارد، با استفاده از DEM منطقه چند نقطه کمکی دیگر (با توجه به ارتفاع منطقه و نقاط فاقد ایستگاه در ارتفاعات) به مجموعه نقاط حالت اول اضافه گردید (شکل ۲). سپس همه مراحل مجدداً برای این داده‌ها نیز تکرار گردید. مشخصات تغییرنا فازی بارندگی سالانه این حالت نیز در جدول (۱) ارائه شده است. در این حالت در هر سه منطقه شعاع همبستگی بارندگی سالانه نسبت به حالت اول افزایش یافته است. مدل تغییرپذیری بارندگی به جز در منطقه B در دو منطقه دیگر تغییر چندانی ندارد و در منطقه A مدل از نوع گوسی و در منطقه C از نوع نمایی می‌باشد.

برای بررسی برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه با روش فازی کریگینگ هر یک از روشهای TPSS، کوکریگینگ، کریگینگ و رگرسیون در هر سه منطقه همگن اجرا گردید. برای انتخاب توان مناسب روش TPSS، این روش با توانهای ۲ تا ۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که توان ۲ دارای کمترین مقدار

جدول ۱- مشخصات نیم تغییرنا بارندگی سالانه در هر یک از واحدها

واحد	نیم تغییرنا بارندگی				نیم تغییرنا متقابل بارندگی و ارتفاع			
	C0	Sill	Rang	نوع مدل	C0	Sill	Rang	نوع مدل
<b>A</b>	5	8.7	1.8	گوسی	800	-450	2.3	نمایی
<b>B</b>	0.01	0.12	0.9	کروی	23.2	117.4	0.38	کروی
<b>C</b>	0.001	0.48	0.55	گوسی	-----	-----	-----	-----
	نیم تغییرنا فازی بارندگی سالانه (حالت اول)				نیم تغییرنا فازی بارندگی سالانه (حالت دوم)			
<b>A</b>	2515	6060	5.37	۹۰٪ گوسی، ۱۰٪ نمایی	1591	4749	6.14	۹۵٪ گوسی، ۵٪ کروی
<b>B</b>	0.0	22171	1.27	۱۰۰٪ گوسی	0	19700	1.62	۵۰٪ نمایی، ۵۰٪ کروی
<b>C</b>	2226	55641	2.11	۱۰۰٪ نمایی	5508	57888	3.15	۷۵٪ نمایی، ۲۵٪ کروی

---- فاقد همبستگی مکانی متقابل



شکل ۵- نیمه تعبیرنمای فازی بارندگی سالانه حالت اول در هر یک از مناطق الف) منطقه A (ب) منطقه B (ج) منطقه C.

جدول ۲- نتایج بررسی روشهای مختلف برآورد بارندگی سالانه در هر یک از مناطق همگن برای حالت اول داده‌ها.

C		B		A		Yearly
MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	
84.6	39.2	55.2	30.2	53.7	13.9	TPSS 2
62.5	9.9	86.1	-42.2	46.7	-9.7	کریگینگ
-----	-----	56.5	-26.0	50.4	-3.8	کوکریگینگ
49.8	-13.8	60.3	24.0	28.7	4.9	فازی کریگینگ
%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	*
57.79	26.78	37.70	20.63	36.68	9.49	TPSS 2
42.69	6.76	58.81	-28.83	31.90	-6.63	کریگینگ
-----	-----	38.59	-17.76	34.43	-2.60	کوکریگینگ
34.02	-9.43	41.19	16.36	19.62	3.35	فازی کریگینگ

\*: درصدها برابر مقدار MBE ویا MAE تقسیم بر میانگین داده‌های مشاهده‌ای در ۱۰۰ می‌باشند.



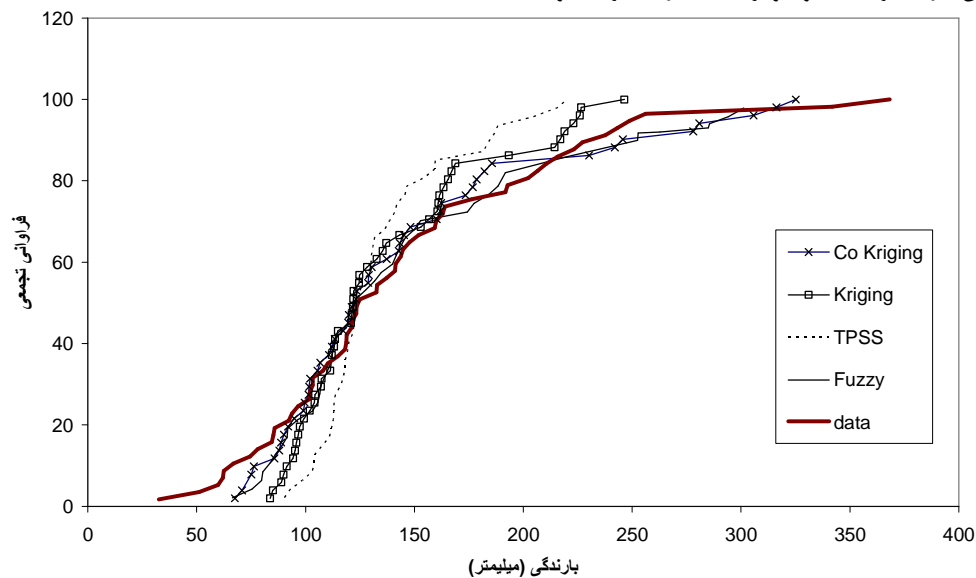
جدول ۳- نتایج بررسی روشهای مختلف برآورد بارندگی سالانه در هر یک از مناطق همگن و بدون نقاط کمی.

C		B		A		Yearly
MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	
78.87	-14.18	35.39	22.5	38.56	-5.95	TPSS 2
62.36	41.54	58.73	-23.5	36.93	-1.06	کریگینگ
----	----	59.82	-26.2	32.99	-5.48	کو کریگینگ
87.5	-3.8	25.30	-21.7	47.87	2.12	رگرسیون
%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	*
53.87	-9.69	24.17	15.37	38.51	-4.06	TPSS 2
42.60	28.37	40.12	-16.05	25.23	-0.72	کریگینگ
----	----	40.86	-17.90	22.53	-3.74	کو کریگینگ
59.77	-2.60	17.28	-14.82	32.70	1.45	رگرسیون

\*: درصدها برابر مقدار MBE ویا MAE تقسیم بر میانگین داده‌های مشاهده‌ای در ۱۰۰ می‌باشند.

به هم نزدیک می‌باشند و در مقایسه با دو روش دیگر نیز به توزیع داده‌ها نزدیکتر هستند. روش فازی کریگینگ در قسمت میانی و انتهای منحنی توزیع به مقادیر مشاهده‌ای نزدیکتر می‌باشد. در دو منطقه دیگر نیز نتایج مشابه بودند. برای حالت دوم پس از آنالیز واریوگرافی، روش کریگینگ، کو کریگینگ و فازی کریگینگ همراه با روش TPSS مجدداً اجرا گردید. سپس مقادیر MAE و MBE هر روش محاسبه گردید. در جدول (۴) این مقادیر ارائه شده است. همانطور که در جدول نیز مشخص است در این حالت نیز در هر سه منطقه روش فازی کریگینگ نتایج مناسبتری ارائه می‌کند.

برای بررسی بیشتر نتایج حاصل از ارزیابی تقاطعی داده‌ها، هر یک از روشها از لحاظ دقت برآورد توزیع مکانی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. برای اینکار از منحنی فراوانی تجمعی داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای حالت اول استفاده گردید. شکل (۶) منحنی‌های فراوانی تجمعی مقادیر برآوردی بارندگی سالانه با روشهای مختلف و مقادیر مشاهده‌ای را برای منطقه A نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز مشخص است همه روشها نسبت به منحنی داده‌های دارای فاصله می‌باشند و به عبارت دیگر همه روشها دارای خطا می‌باشند. روش TPSS نسبت به بقیه روشها دارای فاصله بیشتری از منحنی داده‌ها می‌باشد. روش فازی کریگینگ و کو کریگینگ در بیشتر محدوده‌ها



شکل ۶- نمودار فراوانی تجمعی مقادیر برآوردی بارندگی سالانه با روشهای مختلف و مقایسه آنها با مقادیر مشاهده‌ای در منطقه A در حالت اول.

جدول ۴- نتایج بررسی روشهای مختلف برآورد بارندگی سالانه در هر یک از مناطق همگن برای حالت دوم

C		B		A		روش
MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	
85.6	8.41	81.9	40.5	50.3	15.9	TPSS 2
82.5	38.5	75.0	-27.9	46.3	-1.1	کریگینگ
----	----	71.4	-20.5	45.1	3.2	کوکریگینگ
35.6	12.1	170	20.0	30.7	10.7	فازی کریگینگ
%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	%MAE	%MBE	*
58.47	28.58	55.92	27.67	34.36	10.86	TPSS 2
56.35	26.30	51.22	-19.06	31.63	-0.75	کریگینگ
----	----	48.77	-14.00	30.81	2.19	کوکریگینگ
24.32	8.27	47.88	13.66	20.95	7.31	فازی کریگینگ

\* : درصدها برابر مقدار MBE ویا MAE تقسیم بر میانگین داده‌های مشاهده‌ای در ۱۰۰ می‌باشند.

یک از روشها در هر یک از مناطق همگن اجرا و نتایج روشها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۷) مقادیر MAE و MBE برونیایی هر روش ارائه شده است. همانطور که در شکل نیز مشخص است هرچند مقدار خطای برونیایی در هر سه منطقه بالا می‌باشد، ولی روش فازی کریگینگ نتایج بهتری را ارائه می‌کند. افزایش خطای برونیایی در مناطق B و C که نیاز به برونیایی بیشتری در بعد ارتفاع دارند، بیشتر است. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از چند نقطه کمکی برای مناطق فاقد آمار و استفاده از روش فازی کریگینگ میتواند در برآورد مقادیر بارندگی مناسبتر از بقیه روشها عمل نماید. چراکه این روش در برونیایی داده‌ها نیز بهتر از بقیه روشها عمل می‌نماید. برای مقایسه بیشتر روشها، مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل بارندگی سالانه در هر یک از روشها با مقادیر مشاهده‌ای مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۶). همانطور که در جدول نیز مشخص است در مجموع در هر سه منطقه روش فازی کریگینگ با مقادیر مشاهده‌ای تطابق بهتری از نظر میانگین، بیشترین و کمترین مقدار دارد. بنابر این در مجموع می‌توان گفت که برای استفاده از نقاط کمکی در میانجیابی داده‌های بارندگی سالانه، استفاده از روش فازی کریگینگ مناسبتر از بقیه روشها می‌باشد. شکل (۸) توزیع مکانی بارندگی سالانه را با استفاده از روش فازی کریگینگ نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات ارتفاعی هر یک از مناطق همگن

منطقه	ارتفاع حداکثر منطقه	ارتفاع متوسط منطقه	ارتفاع حداقل ایستگاهها
A	۴۲۶۵	۱۱۷۵	۲۴۵۰
B	۳۹۶۰	۱۲۷۰	۲۸۰۰
C	۴۵۷۰	۱۶۵۵	۲۵۰۰

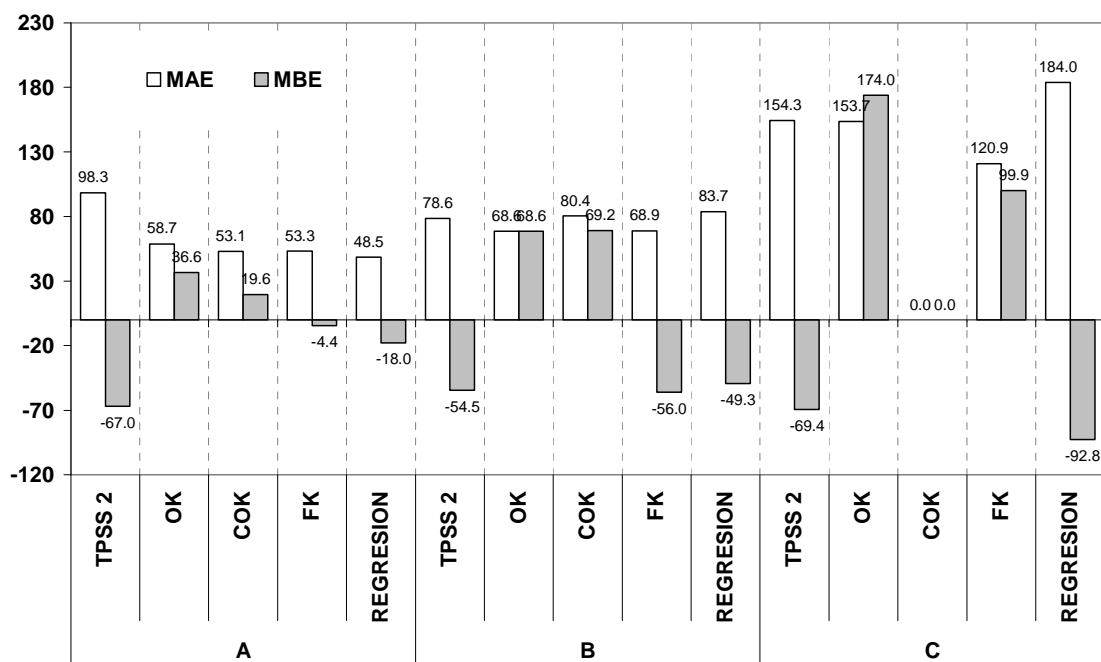
مقایسه مقادیر MAE و MBE این حالت از داده‌ها با حالت اول نشان می‌دهد که به طور کلی در همه روشها مقدار MAE و MBE در حالت دوم افزایش داشته است. هر چند این اختلاف در مورد روش فازی کریگینگ کمتر از بقیه روشها می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد در استفاده از نقاط کمکی محدودیت تعداد وجود دارد و لازم است که تعداد نقاط کمکی بهینه گردد. ضمن آنکه در هنگام استفاده از نقاط کمکی بهتر است از روش فازی کریگینگ که خطای کمتری ارائه می‌کند استفاده نمود.

### ۳-۲- نتایج ارزیابی روشهای مختلف در برونیایی بارندگی

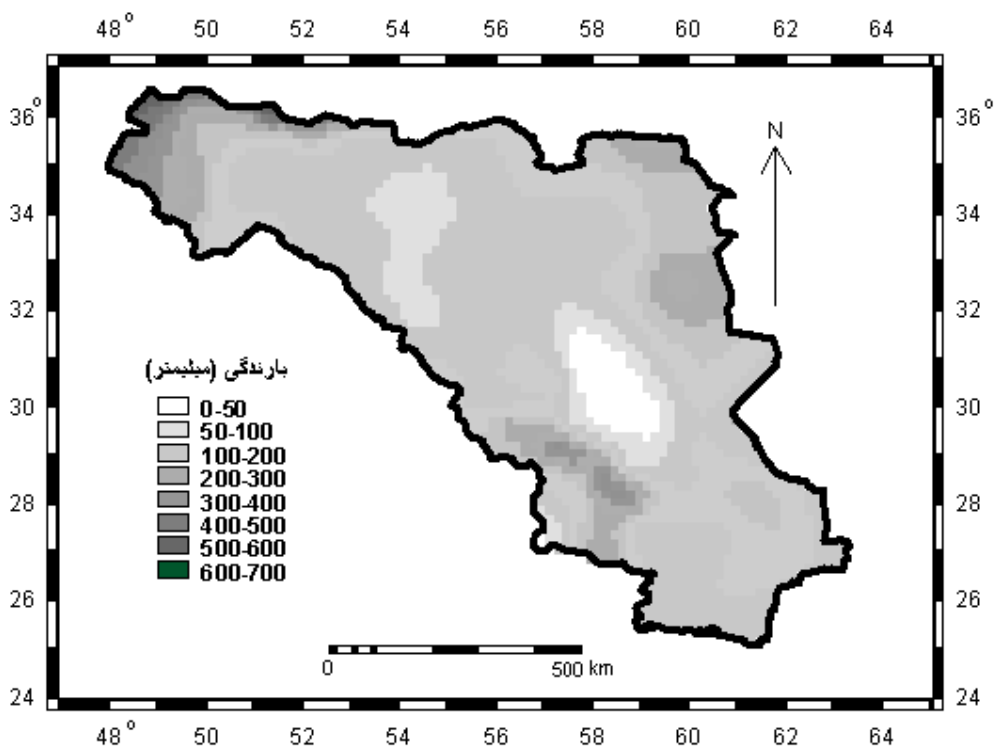
به منظور بررسی کارایی روشهای مختلف در برونیایی داده‌ها، روش فازی کریگینگ، رگرسیون، TPSS و کریگینگ معمولی و کوکریگینگ در هر یک از مناطق برای بارندگی سالانه اجرا گردید. روش کار بدین صورت است که، ابتدا مشخصات ارتفاع هر یک از مناطق از روی مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه استخراج گردید (جدول ۵). سپس میانگین منطقه‌ای ارتفاع در هر یک از مناطق A، B و C به عنوان مرز جداسازی نقاط قرار گرفت. در مرحله بعد ایستگاههایی که بالاتر از ارتفاع متوسط قرار داشتند، به عنوان نقاط شاهد، برای ارزیابی دقت برونیایی حذف گردید. سپس مقادیر برآوردی برای نقاط حذف شده، که در ارتفاعات قرار داشتند، استخراج و مقادیر MBE و MAE آنها محاسبه گردید. برای بررسی وضعیت برونیایی، نیاز به آنالیز تغییرنا برای داده‌های جدا شده می‌باشد. لذا ابتدا نیم تغییرنا معمولی، متقابل و فازی واریوگرام برای هر یک از مناطق محاسبه و رسم گردید. برای روش رگرسیون نیز مجدداً معادلات وایازی چند متغیره در هر منطقه استخراج گردید. سپس هر

جدول ۶- مقادیر برآورد شده میانگین، ماکزیمم و مینیمم بارندگی سالانه در هر یک از روشها و مقادیر مشاهده‌ای.

منطقه	روش	TPSS	کریگینگ	کو کریگینگ	فازی کریگینگ	رگرسیون	داده‌های مشاهده‌ای
منطقه A	میانگین منطقه‌ای	131.29	133.74	138.69	143.85	514.32	143.86
	بیشترین	224.13	286.70	355.00	359.24	1237.65	368.31
	کمترین	88.83	69.40	39.10	44.01	0.00	32.64
منطقه B	میانگین منطقه‌ای	174.15	215.17	191.26	275.00	82.53	237.40
	بیشترین	252.43	400.00	490.42	418.00	102.53	497.67
	کمترین	103.72	16.77	0.00	140.00	54.58	152.04
منطقه C	میانگین منطقه‌ای	269.56	263.18	269.05	279.30	327.27	310.84
	بیشترین	797.00	777.70	785.80	737.60	822.15	721.17
	کمترین	0.00	96.50	97.00	100.90	55.39	94.75



شکل ۷- نمودار مقادیر MAE و MBE روشهای مختلف در هر یک از مناطق همگن برای برونمایی داده‌ها



شکل ۸- نقشه توزیع مکانی بارندگی سالانه با روش فازی کریگینگ در جنوب شرق ایران

#### ۴- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه ارزیابی بکارگیری تئوری مجموعه‌های فازی در برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه بوده که می‌توان نتایج حاصل را به صورت زیر خلاصه نمود:

بارندگی سالانه با استفاده از نقاط کمی روش فازی کریگینگ می‌باشد.

۶. بررسی برونابی داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار خطای برونابی در هر سه منطقه بالا و مناسبترین روش برای برونابی نیز روش فازی کریگینگ می‌باشد.

۱. تقسیم منطقه به واحدهای همگن باعث ایستا شدن داده‌ها بارندگی سالانه در منطقه جنوب شرق ایران می‌گردد.

۲. فرض فازی بودن داده‌های مشاهده‌ای، باعث افزایش شعاع همبستگی بارندگی سالانه گردیده است.

۳. مقایسه مقادیر درصد MAE و MBE روش فازی کریگینگ در هر یک از واحدها، نسبت به روش رتبه دوم در همان واحد، به طور متوسط حدود ۱۰٪ کاهش خطای برآورد را در روش فازی کریگینگ نشان می‌دهد.

۴. استفاده از نقاط کمی برای بهبود وضعیت برآورد داده‌ها، در همه روشها به جز روش فازی کریگینگ باعث افزایش خطای برآورد می‌گردد.

۵. تحلیل منحنی‌های توزیع فراوانی تجمعی داده‌ها و مقادیر برآوردی نشان می‌دهد که مناسبترین روش برای برآورد توزیع

در انتها پیشنهاد می‌گردد که قابلیت روش فازی کریگینگ در برآورد پارامترهای اقلیمی مناطق و اقلیم‌های دیگر کشور، مخصوصاً مناطق کوهستانی که بحث برونابی در ارتفاعات جدی تر می‌باشد، مورد بررسی قرار گیرد. ضمن آنکه ترکیب‌های دیگر تئوری فازی با روشهای درونابی، مانند حالتی از فازی کریگینگ که از تئوری فازی در برآورد اصول آماری استفاده می‌نماید و یا کاربرد تئوری فازی در روشهای میانابی غیرپارامتری نظیر روش اسپلاین‌ها، رگرسیون، میانگین متحرک وزندار، می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

- Information", *Fuzzy Sets and Systems*, 31, pp. 311-327.
- Bartels, F. (1997), "Ein Fuzzy-Auswertungs-und Kriging System fur Raumbezogene Daten. Msc", Thesis, Institute of Informatics, University of Kiel. p. 94. (in German).
- Gallo, G., Spanuolo, M. and Spinello, S. (1998), "Rainfall Estimating from Sparse Data with Fuzzy B-Splines", *Journal of Geographic Information and decision Analysis*, 2(2), pp. 216-236.
- Goovaerts, P. (2000), "Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall", *Journal of Hydrology*, 228(1-2), pp.113-129.
- Hung, Y., Wong, p. and Gedeon, T. (1998), "Spatial Interpolation using Fuzzy Reasoning and Genetic Algorithms", *Journal of Geographic Information and decision Analysis*, 2(2), pp. 204-214.
- Hutchinson, M.F. and Gessler, P.E. (1994), "Splines-Morthan Just A Smooth Interpolator", *Geoderma*, 2, pp. 45-67.
- Issaks, E. and Srivastava, R.M. (1989). "Applied Geostatistics". Oxford Univ. Press, New York., p. 561.
- Stockburger, D.W. (1998), "Multivariate Statistics: Concepts, Models and Applications", Southwest Missouri State University.  
[www.psychstat.smsu.edu/multibook/mlt00.htm](http://www.psychstat.smsu.edu/multibook/mlt00.htm).
- Vega, A. N. (2000), "Potential Applicability of Fuzzy Logic in Geostatistics",  
<http://fibox.vt.edu/a/antiato/web/fuzzy/fuzzy.htm>.
- Watson, G.S. (1984), "Smoothing and Interpolation by Kriging and with Splines", *Mathematical Geology*, 16(6), pp. 601-615.
- Willmott. C.J. (1982). "Some Comments on the Evaluation of Model Performance", *Bulleitein American Meteorological Society*, 36(11), pp. 1313-1982.
- 1- Thin Plate Smoothing Splines  
2- Imprecise  
3- Semi variogram  
4- Extension Principle  
5- $\alpha$ Cut  
6- Cross Validation (C.V)  
7- Mean Absolute Error  
8- Mean Bias Error  
9- Hierarchical Cluster Analysis  
10 - Discriminate Function Analysis

## ۵- مراجع

تقیان، ب.، رحیمی بندرآبادی، س.، طاهری شهرآئینی، ح. و غیومیان، ج. ۱۳۸۳. اثر تراکم ایستگاه و تفکیک منطقه‌ای در برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه (مطالعه موردی بر روی بارندگی جنوب غرب ایران). مجله استقلال، شماره ۱، جلد اول، ۵۹-۷۵.

رحیمی بندرآبادی، س. و مهدیان، م.ح. ۱۳۸۳. بررسی روشهای توزیع مکانی بارندگی روزانه و ماهانه در حوضه دریای خزر. پژوهش و سازندگی. ۶۷.

مهدوی، م.، حسینی چگینی، ا.، مهدیان، م.ح. و رحیمی بندرآبادی، س. بررسی کاربرد روش‌های ژئواستاتستیک در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران. مجله منابع طبیعی ایران. دانشگاه تهران. ۵۷ (۱۲) : ۲۱۱-۲۲۵.

Alhamed, A., Lakshmivarahan, S. and Stensrud, D. J. (2002), "Cluster Analysis of Multimodel Ensemble from SAMEX", *Mon. Wea. Rev.*, 130, pp. 226-256.

Bandermer, H., Gebhardt, A. (2000), "Bayesian Fuzzy Kriging. *Fuzzy Sets and Systems*", 112, pp. 405-418.

Bardossy, A., Bogardi, I. and Kelly, W.E. (1989), "Geostatistics Utilizing Imprecise (fuzzy)

تاریخ دریافت مقاله: ۲۸ مرداد ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۲۹ آذر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۷ آبان ۱۳۸۶