

## برآورد مکانی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های زمین آمار و تیسن (مطالعه موردی: استان همدان)

امیر سالاری<sup>۱\*</sup>، هادی نظری فر<sup>۲</sup>، حامد کاوه<sup>۳</sup>

### چکیده

برآورد دقیق تبخیر و تعرق مرجع، نقشی مهم در مدیریت و مطالعات منابع آب دارد. روش‌های نقطه‌ای متعددی جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع وجود دارد، روش‌های درون‌یابی تیسن و زمین‌آمار، از جمله روش‌هایی هستند که امکان برآورد تبخیر و تعرق را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌سازند. در این روش‌ها برای برآورد و تعمیم متغیر، علاوه بر مقدار آن در ایستگاه محل اندازه‌گیری، رابطه آن با مقدار و موقعیت متغیر در سایر ایستگاه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، از آمار ۱۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و کلیماتولوژی موجود در سطح استان همدان استفاده و تبخیر و تعرق مرجع ماهانه و سالانه کلیه ایستگاه‌ها توسط دو روش پنمن‌مانتیس و تورنت‌وایت تعیین گردید. نتایج نشان داد که در روش کوکریجینگ، بهترین متغیر کمکی، ارتفاع ایستگاه می‌باشد. تحلیل داده‌ها، نشان از وجود غیرهمگنی ژئومتریکی داشت. بهترین مدل واریوگرام در روش کریجینگ مدل نمایی به‌دست آمد. بیشترین خطای روش تیسن مربوط به مناطق شمال‌غربی و جنوبی استان همدان با دامنه تغییر ۰/۵ درصد تا ۱۶ درصد بود. دامنه تغییرات خطای روش کریجینگ بین صفر تا ۱۲ درصد متغیر بوده و بین مناطق شمال‌غربی و جنوب‌غربی منطقه مورد مطالعه توزیع گردید. نتایج نشان داد روش کریجینگ در مقیاس ماهانه و روش فاصله وزنی معکوس در مقیاس سالانه نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌دهند. بنابراین طبق بررسی‌ها و همچنین لزوم بومی‌سازی نقطه‌ای مقادیر تبخیر و تعرق مرجع، در مقیاس ماهانه، روش‌های زمین‌آمار و در مقیاس سالانه (با توجه به سهولت کاربرد)، با در نظر گرفتن دقت مورد نیاز، استفاده از روش تیسن ارجحیت دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، تیسن، تبخیر - تعرق، پنمن‌مانتیس.

- 
- ۱ - استادیار، عضو هیأت علمی، گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان،  
salari.1361@yahoo.com، \* نویسنده مسئول
- ۲ - کارشناس پژوهشی گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، Nazarifar@ut.ac.ir
- ۳ - استادیار، عضو هیأت علمی، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و پژوهشکده زعفران دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه،  
H.Kaveh@torbath.ac.ir، ایران

## مقدمه

ایران کشوری است که به لحاظ اقلیمی جز کشورهای خشک و نیمه خشک جهان محسوب می شود، به طوری که متوسط بارندگی سالانه حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی ها و کمتر از یک سوم بارندگی متوسط کره زمین می باشد، اما میزان تبخیر از سطح آن حدود سه برابر تبخیر خشکی های زمین می باشد، تبخیر و تعرق یکی از مولفه های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین یکی از عوامل کلیدی برای برنامه ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در اراضی فاریاب می باشد، از طرف دیگر تبخیر و تعرق نقش قابل ملاحظه ای در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا کرده و تخمین آن کاربردهای مهمی در پیش بینی رواناب، پیش بینی عملکرد محصول و طراحی کاربری اراضی، طراحی کانال های آبیاری و ابنیه های تقسیم آب داشته و همچنین بر روی بلایای طبیعی موثر است (کی و لیونز<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳؛ اوگاوا<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ مایکل و باستیانسن<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲؛ کوستاس و نورمن<sup>۴</sup>، ۱۹۹۶)

تعیین تبخیر و تعرق مرجع به صورت نقطه ای اندازه گیری و یا برآورد می گردد. از آنجا که بیشتر مطالعات در مقیاس منطقه ای صورت می پذیرد نیاز به تعمیم این اطلاعات از حالت نقطه ای به منطقه ای می باشد. اما به علت توزیع و تراکم نامناسب ایستگاه های هواشناسی امکان بررسی دقیق تغییرات منطقه ای آن نمی باشد. بنابراین ضرورت دارد تا مقادیر تبخیر و تعرق مرجع را در نقاط فاقد آمار معین برآورد و آن را از حالت نقطه ای به منطقه ای تعمیم داد. برای این منظور روش های متعددی از جمله روش های آمار کلاسیک، میانگین حسابی و رگرسیونی وجود دارد که به دلایل مختلف از جمله در نظر نگرفتن موقعیت و آرایش ایستگاه های هواشناسی، ممکن است از دقت

مطلوبی برخوردار نباشند. از دیگر روش هایی که امکان برآورد متغیر را در مقیاس منطقه ای فراهم می سازد، روش های درون یابی زمین آماری و تیسن می باشد. تحقیقات مختلفی جهت تعیین توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش های زمین آماری انجام شده است (کمالی پاشاکلابی و همکاران، ۱۳۹۴؛ وفاخواه و همکاران، ۱۳۸۸؛ جامعی و حجام، ۱۳۸۷، دالزویس<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۲ و گیرتس<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). روش های زمین آماری شامل روش های مختلفی از جمله کریجینگ ساده، معمولی و باقیمانده اصلاح شده، کوکریجینگ، وزن دهی عکس-فاصله و غیره می گردد. هاشمی<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۴) در کلرادو آمریکا از روش بلانی کریدل فائو جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع و از روش زمین آماری وزن دهی عکس فاصله جهت میان یابی آن در مناطق فاقد ایستگاه استفاده نمودند. مارتینز کاب<sup>۸</sup> (۱۹۹۶) بارندگی و تبخیر-تعرق منطقه ای نواحی کوهستانی آراگون اسپانیا را از طریق تحلیل های زمین آماری چندمتغیره تعیین نموده است. در تحقیق یاد شده، کارایی سه روش زمین آماری کریجینگ<sup>۹</sup>، کوکریجینگ<sup>۱۰</sup> و کریجینگ باقیمانده اصلاح شده برای درون یابی متوسط درازمدت کل بارندگی و تبخیر-تعرق مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق روش درون یابی کوکریجینگ نسبت به دو روش دیگر مناسب تر تشخیص داده شد. در برخی از تحقیقات انجام شده با استفاده از روش های مختلف زمین آمار، روش کریجینگ ساده (واندرلیندن<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸)، در تعدادی از این تحقیقات کریجینگ معمولی (گانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ الساممر<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹)، در تعدادی دیگر

<sup>5</sup> - Dalezios

<sup>6</sup> - Geerts

<sup>7</sup> - Hashemi

<sup>8</sup> - Martinez Cob

<sup>9</sup> - Kriging

<sup>10</sup> - Cokriging

<sup>11</sup> - Vanderlinden

<sup>12</sup> - Gong

<sup>13</sup> - Alsamamra

<sup>1</sup> - Ki and Lyons

<sup>2</sup> - Ogawa

<sup>3</sup> - Michael and Bastiaanssen

<sup>4</sup> - Kustas and Norman



برخوردار بوده است. جامعی و موسوی بایگی (۱۳۹۲) نیز طی تحقیقی با عنوان برآورد مکانی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع در استان خوزستان نتیجه گرفتند که روش کوکریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای گوسی دارای کمترین خطا بوده و به‌عنوان بهترین روش برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع معرفی گردید.

بررسی نتایج جفری<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۱)، نشان می‌دهد که یک روش خاص زمین‌آماري را نمی‌توان توصیه نمود، لذا برای آن دسته از متغیرهایی که روش مناسبی گزارش نگردیده، بررسی‌ها و ارزیابی‌ها ضروری است. هدف از انجام این تحقیق، تعیین مدل مناسب و ارزیابی روش‌های درون‌یابی زمین‌آماري و تیسین برای متغیر تبخیر و تعرق مرجع (مرجع) می‌باشد. بدین منظور روش‌های مختلف زمین‌آماري از جمله کوکریجینگ، کوکریجینگ و فاصله وزنی معکوس مورد ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات پایه

استان همدان در مختصات جغرافیایی ۳۴ درجه تا ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. مساحت منطقه برابر ۱۹۴۹۳ کیلومتر مربع معادل با ۱/۲ درصد از کل مساحت کشور می‌باشد. میانگین بارش سالانه استان همدان حدود ۳۳۰ میلی‌متر و متوسط درجه‌حرارت سالانه آن ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر اقلیمی منطقه مورد مطالعه با توجه به تقسیم‌بندی سلسیانف جزو مناطق نیمه-خشک و سرد است (زارع‌ابیان و همکاران، ۱۳۸۳).

### معرفی روش‌های زمین‌آماري

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد روش‌های زمین-آمار به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها، قادر به تخمین داده‌ها در نقطه‌ای با مختصات

کریجینگ باقیمانده (ماردیکیس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵) و در برخی نیز روش وزن‌دهی عکس‌فاصله (کریمی-جعفری و اسلامیان، ۱۳۹۰) به‌عنوان روش‌های برتر پهنه‌بندی و تعیین توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع معرفی شده‌اند. نتایج تحقیق پرایس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۰) به‌منظور بررسی تغییرات مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالانه در غرب و شرق کانادا که بین روش‌های اسپلاین‌های پیرایشی<sup>۳</sup> و GIDS<sup>۴</sup> انجام گردید، نشان دادند که روش اسپلاین‌های پیرایشی در اغلب ماه‌ها نتیجه مناسب‌تری به‌دست می‌آورد اما کاربرد روش GIDS ساده‌تر است. مهدیان و ابری (۱۳۸۶) تغییرات ناحیه‌ای تبخیر و تعرق مرجع را در حوزه کارون با استفاده از چهار روش زمین‌آماري اسپلاین‌های پیرایشی، کریجینگ، کوکریجینگ و میانگین متحرک‌وزنی<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند، نتایج به‌دست آمده نشان داد که برای پنج ماه ژانویه، فوریه، سپتامبر، اکتبر و دسامبر روش میانگین‌متحرک‌وزنی با توان دو و تعداد نقاط همسایگی برابر ۹ و برای دیگر ماه‌ها روش اسپلاین‌های پیرایشی با متغیر کمکی و توان ۴ مناسب‌ترین روش می‌باشد. نوشادی و سپاسخواه (۱۳۸۶) تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده به‌روش هارگریوز-سامانی را با روش‌های کریجینگ قطعه‌ای باقیمانده و مشترک، مورد بررسی قرار دادند، بر اساس نتایج به‌دست آمده، برای تبخیر و تعرق بالقوه مرجع ماهانه، در همه ماه‌های سال به جز فروردین، اردیبهشت و شهریور و نیز برای تبخیر و تعرق مرجع سالانه، روش کریجینگ مشترک برتر بود. بوالحسنی و زارعی (۱۳۹۵) طی تحقیقی با عنوان برآورد مکانی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبریز بختگان نتیجه گرفتند که روش کوکریجینگ نسبت به روش‌های وزن‌دهی عکس‌فاصله و کریجینگ معمولی از دقت بالاتری

<sup>1</sup> - Mardikis

<sup>2</sup> - Price

<sup>3</sup> - Thin plate smoothing spline

<sup>4</sup> - Gradient plus Inverse-Distance-Squared

<sup>5</sup> - Weighted moving average

<sup>6</sup> - Jeffrey

افزایش فاصله به صورت  $a-h$  است و به همین دلیل به روش فاصله وزنی معکوس معروف است. در محاسبات مربوطه  $a$  اعداد صحیحی در دامنه ۱ تا ۴ لحاظ گردیده است و  $h$  فاصله بین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین می‌باشد. همچنین تعداد نقاط همسایگی در اطراف نقطه مورد نظر ۶، ۹، ۱۲ و ۱۶ نقطه در نظر گرفته شد. محاسبات مربوط به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ با پارامتر کمکی ارتفاع و عکس فاصله وزنی در نرم‌افزار GS+5.5 انجام شد.

ارتباط مکانی متغیر با استفاده از تعیین واریوگرام یا تغییرنا صورت می‌پذیرد و چهار عامل اثر قطعه‌ای<sup>۲</sup> ( $C_0$ )، سقف<sup>۳</sup>، دامنه موثر<sup>۴</sup> و نسبت مؤلفه ساختاردار به مجموع اثر قطعه‌ای و مؤلفه ساختاردار ( $C/C_0+C$ )، اساس و پایه تجزیه و تحلیل تغییرناها می‌باشد.

برای ارزیابی میزان دقت و خطا و انتخاب بهترین روش در این تحقیق از دو معیار آماری واسنجی و خطای انحراف از میانگین براساس روابط ۳ و ۴ استفاده شد.

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

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

پارامترهای روابط ۳ و ۴ در روابط ۱ و ۲ معرفی شده‌اند.

در این بررسی داده‌های مورد نیاز از ۱۱ ایستگاه متعلق به سازمان هواشناسی استان جمع آوری گردید. برای رعایت اصول میان‌یابی، علاوه بر ایستگاه‌های منطقه از ۷ ایستگاه مجاور منطقه مورد مطالعه نیز استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های منتخب در سطح منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است. ۹ ایستگاه از ۱۶ ایستگاه موجود، سینوپتیک می‌باشند که برای

معلوم دیگر هستند. روش کریجینگ براساس میانگین متحرک وزنی به‌عنوان بهترین تخمینگر نااریب شناخته شده است که رابطه کلی آن به‌صورت زیر است (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۷).

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

که در آن  $Z^*(x_i)$  مقدار تخمینی متغیر در موقعیت  $x_i$ ،  $\lambda_i$  وزن یا اهمیت نمونه  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده شده متغیر و  $n$  تعداد مشاهدات است. شرط استفاده از روش کریجینگ آن است که متغیر  $Z$  دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این‌صورت باید از روش کریجینگ غیرخطی استفاده نمود و یا به نحوی توزیع متغیر نرمال گردد ( $H$ ).

برای روش کوکریجینگ مشابه با آمار کلاسیک چند متغیره، می‌توان بر اساس همبستگی بین متغیرهای مختلف، مقادیر پارامتر مجهول را مطابق رابطه ۲ تخمین زد (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۷).

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + \sum_{j=1}^n k_j y_j \quad (2)$$

که در آن:  $Z^*(x_i)$  مقدار تخمینی متغیر در نقطه  $x_i$ ،  $\lambda_i$  وزن مربوط به نمونه  $Z_i$ ،  $k_j$  وزن مربوط به متغیر کمکی  $y_j$ ،  $Z_i$  مقدار مشاهداتی متغیر اصلی و  $y_j$  مقدار مشاهداتی متغیر کمکی می‌باشد.

در روش فاصله وزنی معکوس با وزن‌دهی به داده‌های اطراف نقطه (ایستگاه) مورد برآورد، کمیت مجهول به‌دست می‌آید. در این روش چنین فرض است که هر نقطه اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) دارای یک اثر محلی است و با افزایش فاصله از تاثیر آن کاسته می‌شود. بدین ترتیب نقاط نزدیکتر دارای وزن بیشتری هستند. رابطه آن مانند رابطه ۲ می‌باشد، با این تفاوت که  $\lambda_i$  مربوط به فاصله است و با افزایش فاصله مقدار آن کاهش می‌یابد (واستن<sup>۱</sup>، ۱۹۸۴). اثر

<sup>2</sup> - Nagget

<sup>3</sup> - Sill

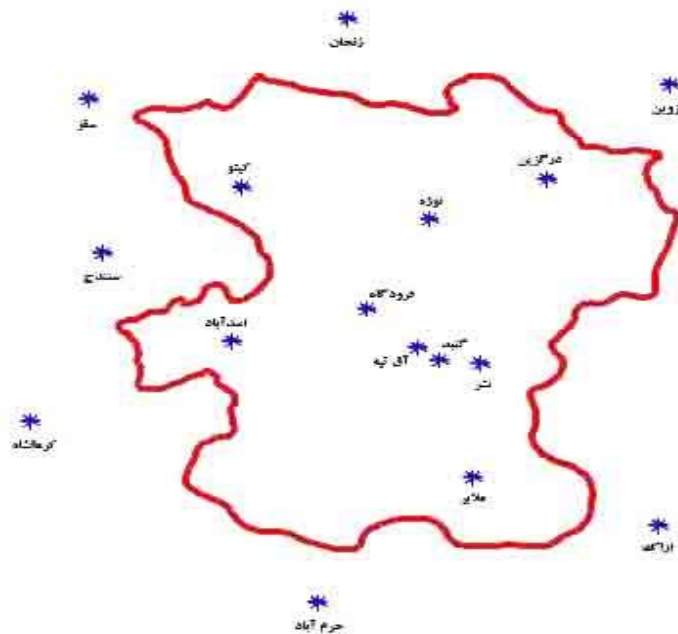
<sup>4</sup> - Rang

<sup>1</sup> - Wasten

ایستگاه‌های موجود به‌منظور تولید مقادیر برآوردی برای سایر ایستگاه‌ها استفاده شد. بدین ترتیب که جهت برآورد یک مقدار برای هر ایستگاه، مقدار واقعی آن ایستگاه حذف و دو مرتبه یک مقدار تخمینی بر اساس موقعیت و داده‌های سایر ایستگاه‌ها محاسبه گردید. مقادیر برآورد شده برای هر ایستگاه در مقابل مقادیر واقعی آن ایستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت.

ارزیابی روش‌های ارائه شده در این تحقیق، بر اساس بزرگی و توزیع خطاهای بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط روش‌های درون‌یابی قرار داده شد. برای این منظور از شاخص‌های آماری ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خط و میانگین قدر مطلق خط و بررسی تفاوت توزیع مکانی قدر مطلق خط‌ها به‌منظور شناسایی مناطقی که بزرگترین اختلافات روی داده، استفاده گردید.

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش پنمن‌مانتیس استفاده شد و برای سایر ایستگاه‌ها که داده‌های لازم برای استفاده از روش پنمن‌مانتیس را نداشتند اما حداقل دما در آنها اندازه‌گیری شده است از روش تورنت‌وایت استفاده گردید. اما با توجه به تاکید FAO به برتری پنمن‌مانتیس نسبت به بقیه روش‌ها، در این تحقیق نتایج تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از دو روش برای ماه‌های مختلف و در مقیاس سالانه برآورد و روابط بین دو روش تعیین گردید و برای ایستگاه‌هایی که فقط تبخیر و تعرق مرجع به روش تورنت‌وایت محاسبه شده بود مقداری معادل روش پنمن‌مانتیس بر اساس روابط یاد شده برآورد شد. پلی‌گون‌های تیسن نیز با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزارهای Arcview و Arc/info بر اساس لایه پوشش نقطه‌ای اطلاعات مکانی ۱۶ ایستگاه ایجاد گردید. به‌منظور ارزیابی دو روش میان‌یابی، از همان



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در سطح استان همدان

توجه به عدم تابعیت داده‌ها از توزیع نرمال، داده‌ها با استفاده از تابع لگاریتمی تبدیل گردیدند. در روش کوکریجینگ نیز متغیر کمکی ارتفاع ایستگاه می‌باشد

## نتایج

در ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در روش کوکریجینگ باید داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمایند. با

که بر اساس تحقیقات سایر محققین (یاتس<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶) ضریب همبستگی بین متغیر کمکی و اصلی باید بزرگتر از ۰/۵ باشد. به همین منظور رابطه بین تبخیر و تعرق مرجع ماهانه و سالانه و ارتفاع ایستگاه تعیین گردید و نشان داد که در همه ماههای سال همبستگی بین این دو متغیر بالای ۰/۵ می باشد. بررسی داده‌ها بیانگر وجود ناهمسانگردی هندسی است. نتایج تحلیل واریوگرافی برای روش میان‌یابی کریجینگ در جدول ۱ و برای روش میان‌یابی کوکریجینگ در جدول ۲ نشان داده شده است.

چنانچه در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، در روش کریجینگ نسبت مؤلفه ساختاردار به مجموع اثر قطعه‌ای و مؤلفه ساختاردار  $(C/C_0+C)$ ، دارای میانگین ۵۸ درصد می‌باشد که از ۴۵/۷ درصد در آذر تا ۸۸/۷ درصد در مرداد متغیر است. بنابراین نقش مؤلفه ساختاردار تبخیر و تعرق مرجع در کلیه ماهها بیش از نقش مؤلفه بی‌ساختار می‌باشد که حاکی از ساختار مکانی مناسب تبخیر و تعرق مرجع در منطقه مطالعاتی است. دامنه تأثیر داده‌ها بین ۱۴۷ کیلومتر تا ۳۵۶ کیلومتر متغیر است.

<sup>1</sup> - Yates

جدول ۱: نتایج ارزیابی دو روش میان‌یابی کریجینگ و پارامترهای نیم‌تغییرنما

ماه	مدل	C0 (mm <sup>2</sup> )	Sill (mm <sup>2</sup> )	دامنه تأثیر Km	C/(C0+C)	r <sup>2</sup>	MBE (mm)	MAE (mm)
دی	نمایی	۰/۱۰۰	۸/۲	۱۴۷/۰۱	۰/۵۸۸	۰/۶۸۷	۸/۹۱	۷/۹۳
بهمن	کروی	۰/۰۱	۸/۰۲	۲۳۸/۰۱	۰/۵۹۹	۰/۹۶۵	۶/۸۳	۷/۷۳
اسفند	نمایی	۰/۰۰۱	۲/۰۱	۱۵۶/۸۸	۰/۶۲۶	۰/۶۱۵	۵/۶۴	۶/۷
فروردین	کروی	۰/۰۰۱	۱/۶۱	۲۵۷/۹۱	۰/۷۶۹	۰/۳۲۶	۳/۰۷	۲/۵۲
اردیبهشت	کروی	۰/۰۰۱	۰/۰۶۲	۲۲۹/۶	۰/۶۹۸	۰/۰۳۲	۲/۵۴	۳/۱۱
خرداد	کروی	-۰/۰۰۱	-۰/۷۰۱	۱۷۳/۱۱	۰/۶۸۹	۰/۲۵۶	۲/۵۸۶	۲/۹۶
تیر	کروی	-۰/۰۰۱	-۰/۷۷	۳۲۵/۵۱	۰/۷۸۹	۰/۴۰۸	۰/۱۸۶	۰/۹۱۵
مرداد	کروی	-۰/۰۰۱	-۰/۳۸	۲۰۳/۸۹	۰/۸۸۷	۰/۲۵۸	۰/۱۰۰	۰/۹۷۲
شهریور	کروی	۰/۰۰۱	۰/۷۴۹	۲۴۵/۲۱	۰/۷۴۹	۰/۱۷۵	۰/۱۰۸	۰/۹۴۷
مهر	کروی	۰/۰۰۱	۲/۰۱	۳۵۶/۲۱	۰/۶۴۵	۰/۷۶۴	۰/۲۱۹	۷/۱۰
آبان	نمایی	۰/۰۰۱	۲/۰۱	۱۳۶/۹۹	۰/۵۲۱	۰/۷۸۹	۱/۹۷	۱/۲
آذر	کروی	۰/۰۰۷	۲/۰۳	۲۱۱/۰۸	۰/۴۵۷	۰/۷۲۵	۲/۶۳	۲/۵۲
سالانه	نمایی	۰/۰۰۱	۱/۷۵	۲۵۱/۳۱	۰/۷۴۹	۰/۶۲	۶/۹۸۸	۸/۶۹

جدول ۲: نتایج ارزیابی دو روش میان‌یابی کوکریجینگ و پارامترهای نیم‌تغییرنما

ماه	مدل	C0 (mm2)	Sill (mm2)	دامنه تأثیر Km	C/(C0+C)	r2	MBE (mm)	MAE (mm)
دی	گوسی	۰/۱۴۳	۰/۲۸	۱۲۵/۲۱	۰/۴۳۲	۰/۰۸۸	۱۵/۳۴۲	۱۳/۵۵۴
بهمن	کروی	۰/۰۹۷	۰/۱۹۴	۱۸۷/۳۲	۰/۴۰۳	۰/۱۸۳۵	۵۱/۴۸	۳۱/۹۵
اسفند	گوسی	۰/۰۹۳	۰/۲۹۱	۳۲۵/۳۶	۰/۶۷۸	۰/۷۶۲	۱۵/۸۵	۱۴/۶۸
فروردین	گوسی	۰/۱۴۴	۰/۲۹	۳۱۲/۵۲	۰/۵۰۲	۰/۲۲	۱۳/۵۵	۱۷/۰۸
اردیبهشت	گوسی	۰/۲۷	۰/۵۵	۱۸۹/۴۵	۰/۴۰۶	۰/۳	۲۱/۵۵	۱۱/۷۶
خرداد	کروی	۰/۴۰۱	۰/۸۰۳	۲۸۵/۶۳	۰/۴۹۱	۰/۱۰۶	۱۰/۴۷۵	۱۲/۱۵۸
تیر	کروی	۰/۲۰۶	۰/۴۱	۱۵۴/۹۶	۰/۵۰۱	۰/۵	۱۱/۱۶۶	۱۱/۰۱
مرداد	کروی	۰/۰۴۸	۰/۳۳۱	۱۷۸/۵۴	۰/۷۵۵	۰/۱۳۴	۱۲/۱۳۲	۱۴/۹۶
شهریور	گوسی	۰/۰۴۷	۰/۲۹۵	۲۷۸/۳۵	۰/۶۶	۰/۱	۱۱/۳۸۸	۱۲/۴۰۴
مهر	گوسی	۰/۱۷۵	۰/۳۷۱	۱۴۵/۳۲	۰/۵۲۸	۰/۶۳۲	۱۱/۵۸	۱۲/۸۲
آبان	گوسی	۰/۰۹۲	۰/۲۱	۱۱۲/۸۵	۰/۵۷۸	۰/۳۵۱	۱۱/۸۸	۲۰/۸۳
آذر	گوسی	۰/۰۹۷	۰/۱۹۵	۲۶۴/۱۱	۰/۵۰۳	۰/۱۲	۱۴/۳۲	۱۲/۱۹
سالانه	گوسی	۰/۰۷	۰/۱۴۲	۲۰۲/۴۱	۰/۵۰۴	۰/۱۶۲	۲۱/۱۷	۱۱/۶۲

ضریب همبستگی، MBE و MABE در هیچ یک از مقیاس‌های زمانی مناسب نیست (جدول ۲).

نتایج محاسبات ارزیابی روش فاصله وزنی معکوس با توان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در جدول ۳ بر اساس توان و تعداد نقاط همسایگی ارائه شده است.

علاوه بر تأثیر توان در این روش، تعداد نقاطی که در برآورد نقش دارند، نیز در افزایش و کاهش دقت تخمین موثرند. پس از انتخاب تعداد نقاط همسایگی مناسب، تأثیر توان بر میزان انحراف و خطای روش مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی این نتایج و بر اساس شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان گفت که تفاوت بین خطای تعداد همسایگی‌های مختلف چندان زیاد نمی‌باشد ولی این تفاوت در مورد توان‌های مختلف قابل ملاحظه می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت که استفاده از توان ۲ و تعداد نقاط همسایگی ۹، برای متغیر مورد نظر مناسب است.

در روش کوکریجینگ نسبت  $(C/C_0+C)$  با متوسط  $۴۳/۹$  درصد حاکی از وجود ساختار مکانی ضعیف داده‌هاست و این نسبت بین  $۴۰/۶$  درصد در اردیبهشت ماه تا  $۷۵$  درصد در مرداد ماه متغیر است. میانگین دامنه تأثیر در این روش در حدود  $۲۲۰$  کیلومتر است که نسبت به روش کریجینگ در اکثر ماه‌ها افزایش یافته است (جدول ۲).

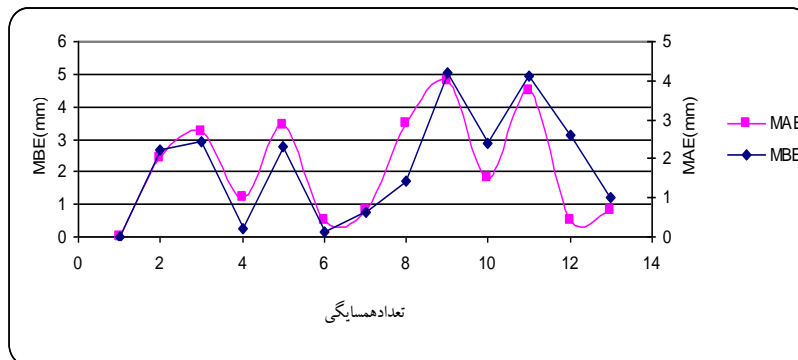
بر اساس نتایج جدول ۱ و با استفاده از تحلیل واریوگرافی، مناسب‌ترین مدل واریوم تعیین گردید که به ترتیب مدل نمایی و کروی در روش کریجینگ بهترین تطابق را داشت. همچنین روش کریجینگ در فصل تابستان با واریوگرام کروی دارای ساختار قوی‌تری نسبت به روش فاصله وزنی معکوس است، اما در مقیاس سالانه دارای مقیاس ضعیف‌تری می‌باشد. همچنین روش فوق نشان می‌دهد که در روش کوکریجینگ، مدل گوسی با توجه به شاخص‌های



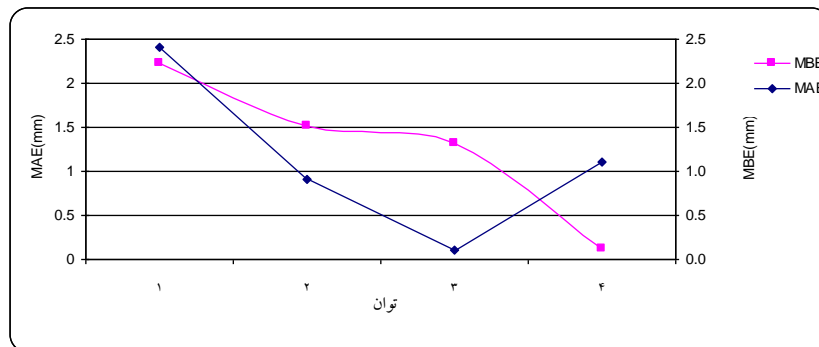


جدول ۳: نتایج ارزیابی به روش فاصله وزنی معکوس

ماه	تعداد همسایگی			MAE (mm)				MBE (mm)			
	توان ۱	توان ۲	توان ۳	توان ۱	توان ۲	توان ۳	توان ۴	توان ۱	توان ۲	توان ۳	توان ۴
بهمن	۹	۹	۹	۳/۰۵	۳/۱۱	۳/۳۰	۳/۵۸	۵/۴۴	۴/۸۵	۲/۵۷	۲/۴۳
اسفند	۶	۶	۶	۴/۲۲	۴/۷۹	۵/۲۶	۵/۳۳	۲/۷۷	۲/۴۵	۲۴/۷۶	۵/۵۶
فروردین	۹	۹	۹	۶/۱۴	۶/۰۸	۶/۱۸	۶/۳۶	۶/۸۵	۵/۷۴	۴/۱۴	۳۲/۵۱
اردیبهشت	۹	۹	۹	۵/۲۳	۵/۲۰	۵/۲۷	۵/۴۰	۶/۶۹	۳/۱۴	۵/۶۷	۴/۲۶
خرداد	۶	۶	۶	۵/۶۴	۶/۵۴	۶/۶۶	۶/۷۶	۸/۵۰	۶/۷	۴/۸	۵/۱۳
تیر	۱۲	۱۲	۱۲	۴/۳۳	۴/۳۵	۴/۳۹	۴/۴	۲۰/۱۳	۲۰/۸۶	۲۱/۷۳	۲۲/۷۱
مرداد	۱۲	۱۲	۱۲	۳/۵۶	۳/۵۵	۳/۵۰	۳/۴۰	۱۱/۳۷	۱۱/۶۶	۱۱/۹۹	۱۲/۳۴
شهریور	۱۲	۱۲	۱۲	۰/۶۹۵	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۶۲	۷/۹۳	۹/۹۴	۱۱/۹۶	۱۰/۹۹
مهر	۱۶	۱۶	۱۶	۰/۲۴۸	۰/۲۴۳	۰/۲۳۴	۰/۲۲	۵/۹۰	۶/۹۱	۵/۹۲	۳/۹۳
آبان	۱۶	۱۶	۱۶	۰/۳۷۶	۰/۳۷۱	۰/۳۵۴	۰/۳۲۵	۱/۹۰	۱/۸۷۵	۲/۸۵۳	۱/۸۳۱
آذر	۱۶	۱۶	۱۶	۰/۳۱۵	۰/۲۸۱	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۹۱۲	۰/۹۴	۰/۹۷۲	۱/۰۰۶
سالانه	۱۶	۱۶	۱۶	۱/۷۵	۱/۸۶	۲/۰۱	۲/۱۵	۳/۵۱	۵/۹۹	۶/۵۲	۷۲/۰۶



شکل ۲: رابطه تعداد همسایگی با خطا و انحراف متوسط در روش فاصله وزنی معکوس برای ماه آبان



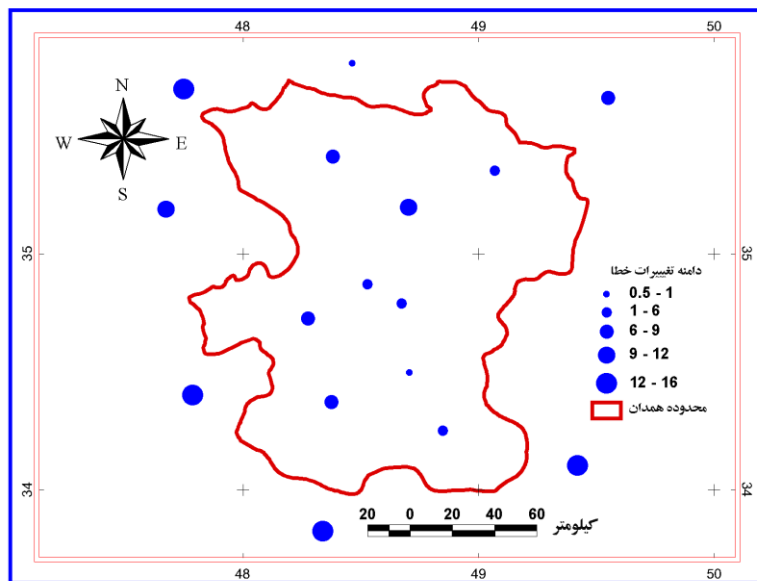
شکل ۳: رابطه توان با خطا و انحراف متوسط در روش فاصله وزنی معکوس برای ماه آبان

ترسیم توزیع مقادیر خطای مطلق بر روی یک نقشه می‌تواند در تشخیص چگونگی توزیع این مقادیر مفید واقع شود (شکل ۴). در درون‌یابی روش تیسن مقادیر بزرگی خطاها برای آن ایستگاه‌هایی که در نواحی شمال‌غربی و جنوبی قرار گرفته‌اند گسترش بیشتری دارند و دامنه تغییرات خطاها بین ۰/۵٪ تا ۱۶٪ می‌باشد. اما در روش کریجینگ نحوه توزیع این خطاها در نواحی شمال‌غربی و جنوب‌غربی می‌باشد ولی این روش نسبت به روش تیسن برآوردهای بهتری حاصل می‌نماید و دامنه تغییرات خطاها بین ۰ تا ۱۲٪ می‌باشد.

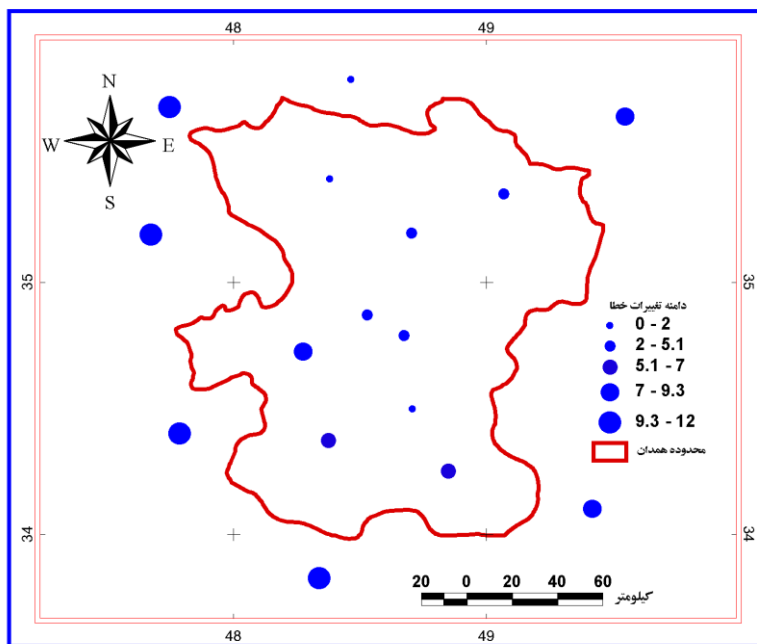
جدول ۴ نتایج حاصل از ارزیابی‌های آماری میان روش‌های کریجینگ و تیسن را نشان می‌دهد. در روش کریجینگ، ریشه میانگین مربعات خط و میانگین قدر مطلق خطا برای ماه‌های فصل تابستان که تبخیر و تعرق قابل توجه می‌باشد به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از روش تیسن می‌باشد اما در مقیاس سالانه، این تفاوت‌ها زیاد نمی‌باشد، ولی با توجه به سهولت کاربرد روش تیسن، با در نظر گرفتن دقت مورد نیاز امکان استفاده از روش تیسن می‌باشد.

جدول ۴: نتایج حاصل از ارزیابی‌های آماری روش‌های زمین‌آماري و تیسن

$(R^2)$	$(MAE)$	$(RMSE)$	مقیاس سالانه	$(R^2)$	$(MAE)$	$(RMSE)$	مقیاس فصلی
۰/۸۷	۰/۹۱	۱/۵۸	تیسن	۰/۹	۱/۲۶	۲/۱۵	تیسن
۰/۹۲	۰/۷۶	۱/۳۵	کریجینگ	۰/۹۸	۰/۷۸	۱/۰۸	کریجینگ
۰/۹۱	۰/۶۱	۱/۱۵	فاصله وزنی	۰/۹۴	۱/۰۲	۱/۵۸	فاصله وزنی



(الف)

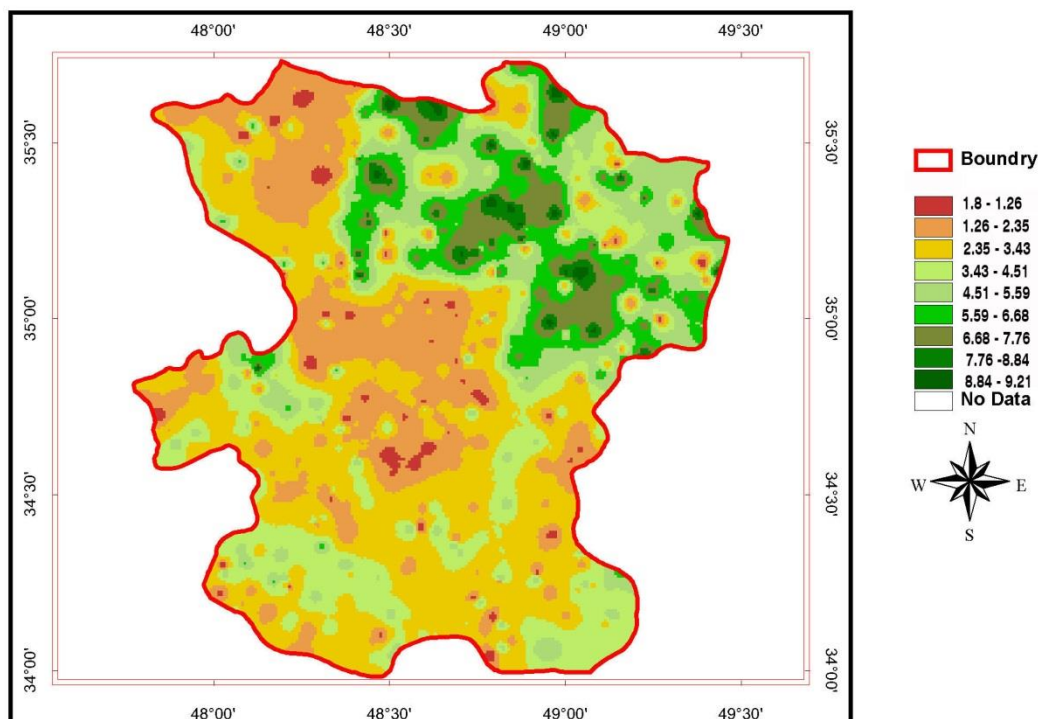


(ب)

شکل ۴: نحوه توزیع مقادیر خطای مطلق در مقیاس فصلی، الف) روش تیسن ب) روش کریجینگ

داده و سایر نقاط از میزان تبخیر و تعرق کمتری برخوردار بوده به طوری که حداقل مقدار تبخیر و تعرق مرجع آن در مناطق مرکزی و شمال غربی رخ داده است (شکل ۵).

نقشه گسترش مکانی تبخیر و تعرق مرجع با روش فاصله وزنی معکوس در مقیاس سالانه به عنوان روش برتر در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نیز مشهود است حداکثر میزان تبخیر و تعرق مرجع استان همدان در مناطق شمال شرقی آن رخ



شکل ۵: نقشه گسترش مکانی تبخیر و تعرق مرجع با روش فاصله وزنی معکوس در مقیاس سالانه

### نتیجه گیری

با توجه به ضرورت تعمیم مقادیر تبخیر و تعرق مرجع از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای، روش‌های درون-یابی زمین‌آماري و تیسین برای این منظور می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در میان روش‌های زمین-آماري در این مطالعه، روش کریجینگ برای ماه‌های فصل تابستان و روش فاصله وزنی معکوس در مقیاس سالانه از دقت مناسبی برخوردار می‌باشند. مقایسه روش‌های درون‌یابی زمین‌آماري و تیسین نشان داد که در مقیاس فصلی روش‌های زمین‌آماري دارای دقت بالاتری هستند اما در مقیاس سالانه با توجه به سهولت کاربرد روش تیسین، با در نظر گرفتن دقت مورد نیاز امکان استفاده از روش تیسین می‌باشد

## منابع

- بوالحسنی، ک.، و زارعی، ح. ۱۳۹۵. برآورد مکانی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی. دو فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، سال ۶، شماره ۱۳، ص ۷-۲۱.
- جامعی، م.، و حجام، س. ۱۳۸۷. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در برآورد منطقه‌ای تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: استان خوزستان). سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز.
- جامعی، م.، و موسوی‌بایگی، م. ۱۳۹۲. برآورد مکانی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع در استان خوزستان. مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، سال ۲۱، ص ۲۳-۴۲.
- زارع‌ایبانه، ح.، محبوبی، ع.، و نیشابوری، م. ۱۳۸۳. ارزیابی وضعیت خشکسالی و فرآیندهای آن در منطقه همدان بر اساس شاخص‌های آماری خشکسالی. مجله پژوهش و سازندگی. ص ۶۴: ۲-۷.
- کریمی‌جعفری، م.، و اسلامیان، س. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تخمین تبخیر و تعرق مرجع. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی ایران. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- کمالی‌پاشاکلایی، م.ا.، فریدحسینی، ع.، انصاری، ح.، و غلامی‌سفیدکوهی، م.ع. ۱۳۹۴. ارزیابی دو روش تهیه نقشه‌های تغییرات مکانی تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: استان مازندران) نشریه آبیاری و زهکشی ایران. سال ۱، شماره ۹، ص ۲۲۱-۲۳۲.
- مهدیان، م.، و ابری، ا. ۱۳۸۶. مطالعه تغییرات مکانی تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه کارون. نهمین سمینار آبیاری و تبخیر و تعرق، ص ۳-۱۱.
- نوشادی، م.، و سپاسخواه، ر. ۱۳۸۶. آنالیز زمین‌آمار تبخیر و تعرق. نهمین سمینار آبیاری و تبخیر و تعرق. ص ۵۶-۶۵.
- وفاخواه، م.، محسنی، و.، ساروی، م.، و اونق، م. ۱۳۸۸. مقایسه روش‌های زمین‌آمار در برآورد تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه نمک). مجله پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۰-۳۹: (۸۳)۳۰.
- یزدانی، م.، چاوشی، م.، هاداقلی، و.، و سققیان، ب. ۱۳۸۷. پژوهش روی خشکسالی هواشناسی در استان اصفهان. مجله آب و خاک. شماره ۴، ص ۴۱-۵۱.
- Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., and Tovar-Pescador, J. 2009. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 1343 – 1357.
- Dalezios, N. R., Loukas, A. and Bampzelis, D. 2002. Spatial Variability of Reference Evapotranspiration in Greece, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 27(23-24): 1031-1038.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C. and Buytaert, W. 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agricultural and forest meteorology*. 139(3): 399-412.
- Gong, L., Xu, Ch., and Chen, D. 2005. Spatial interpolation and analyses of reference evapotranspiration and its temporal trends in Changjiang (Yangtze River) Catchment, China. *Geophysical Research Abstracts*. 7: 23-32.
- Hashemi, M., Garcia, L.A., Fontane, D.G. 1994. Spatial estimation of regional crop evapotranspiration, *transaction of the ASAE*. 38(8): 1345-1351.
- Jeffrey, S.J., Carter, J.O., Moodie, K.B. and Beswich, A.R. 2001. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Environmental Modelling & Software*. 16: 309-330.



- Ki, F. and Lyons, T. J. 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. *Agricultural Water Management*. 61: 112-124.
- Kustas, W. P. and Norman, J. M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Journal of Hydrology*. 4: 495-516.
- Mardikis, M. G., Kalivas, D. P. and Kollias, V. J. 2005. Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration-An Application in Greece. *Journal Water Resources Management*. 19(3): 251-278.
- Martinez-Cob, A. 1996. Multivariate geostatistical analysis of evaporation and precipitation in mountainous terrain. *Journal of Hydrology*. 174: 495-516.
- Michael, M.G. and Bastiaanssen, W.G.M. 2002. A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya. *Irrigation and Drainage Systems*. 14: 237-256.
- Ogawa, S., Murakami, T., Tshitsuka, N. and Saito, G. 1999. Evapotranspiration estimates from fine-resolution NDVI. National institute of Agro- Environmental Science (Japan).
- Price, D.T., Mckenny, D.W., Nalder, I.A., Hutchinson, M.F. and Kesteven, J. 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation. *Canadian monthly mean climate data*. *Agriculture and forest*. 101(2-3): 81-94.
- Wasten, G.S. 1984. Smoothing and interpolation by Kriging and Weighted Moving Average. *Mathematical Geology*. 24(4): 381-391.
- Vanderlinden, K., Giraldez, V. and Meirvenne, M. 2008. Spatial Estimation of Reference Evapotranspiration in Andalusia, Spain. *Journal of Hydrometeorology*. 9: 242-255
- Yates, S.R. 1996. Disjunctive Kriging and cokriging. *Water Resource Research*. 22(10): 1371-1376.



## Spatial Estimation and Zoning of Reference Evapotranspiration Using the Geostatistics and Thiessen Method (Case study: Hamadan Province)

Amir Salari <sup>\*۱</sup>, Mohammadhadi Nazarifar<sup>۲</sup> and Hamed Kaveh <sup>۳</sup>

### Abstract

Estimation of reference evapotranspiration is one of the important components of water balance in each region and that is one of the effective factors in proper irrigation planning for improving water use efficiency. Among the methods that allow the estimation of variables on a regional scale, two methods of geostatistics and Thiessen have key roles for land interpolation in extensive level. This study was conducted in Hamadan province. The best variograms was determined, which were the best fit for the exponential model in Kriging method. In the Thiessen method's internal analysis, large values of errors are expanded for those stations located in the north-west and south regions, and the range of error variations is between 0.5% to 16%. However, in the Kriging method, these errors are distributed in the north-west and south-west regions, while this method estimated better than Thiessen's method, and the range of error variations is between 0% to 12%. Comparison of geostatistics and Thiessen interpolation methods showed that in the scale of the seasonal, the geostatistical methods have a higher accuracy, but on an annual scale considering the ease of using the Thiessen method, taking into account the accuracy required, there is the possibility of using Thiessen's method.

**Key words:** Geostatistics, Thiessen, Evapotranspiration, Penman-Montith.

---

<sup>1</sup>- Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Minab Higher Education Center, University Of Hormozgan (\* - Corresponding author E-mail: Salari.1361@yahoo.com).

<sup>2</sup>- Research expert, Department of irrigation and drainage, Pardis of Aboreihan, Tehran University, [Nazarifar@ut.ac.ir](mailto:Nazarifar@ut.ac.ir)

<sup>3</sup>- Assistant professor, Department of Plant Production, Faculty of Agricultural and Natural Resources and Saffron Institute, University of Torbat Heydarieh, [H.Kaveh@torbath.ac.ir](mailto:H.Kaveh@torbath.ac.ir)