



## Assessment of Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices in Tehran Province

R. Akhtari<sup>1</sup>, M. H. Mahdian<sup>2</sup> and S. Morid<sup>3</sup>

### Abstract

Drought monitoring is quite important in planning for drought mitigation schemes. Drought indices are normally used for monitoring purposes. However, the indices are calculated at sites and it is required to estimate the spatial distribution of drought in the forms of maps. Geostatistical methods are among such tools that may be applied for preparing spatial distribution maps. In this research, several geostatistical methods including Kriging, Cokriging, TPSS with and without secondary variables as well as weighted moving average (WMA) were assessed with respect to derivation of drought index maps. Drought monitoring and mapping was conducted based on SPI and EDI indices using data of 43 rain gauge stations within Tehran province. The results indicated that although Kriging was the most accurate method, WMA provided reasonable accuracy blended with more efficient computer time, a major consideration in monitoring systems.

**Keywords:** Drought, Geostatistics, SPI, EDI, Kriging, WMA, TPSS.

## تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI در استان تهران

روح انگیز اختری<sup>۱</sup>، محمد حسین مهدیان<sup>۲</sup> و  
سعید مرید<sup>۳</sup>

### چکیده

سیستم‌های پایش در تدوین طرح‌های مقابله با خشکسالی و مدیریت آن از اهمیت زیادی برخوردار هستند که بدین منظور از شاخص‌های خشکسالی برای بیان کمی این پدیده استفاده می‌گردد. اما معمولاً این شاخص‌ها به صورت نقطه‌ای محاسبه می‌شوند و لازم است تا به صورت مکانی پردازش شده و نقشه‌های مربوط ارائه گردند. روش‌های زمین‌آمار از جمله تکنیک‌هایی می‌باشند که می‌تواند در این راستا مورد استفاده قرار گیرد و این در صورتی است که متغیر مورد بررسی یک متغیر مکانی باشد. تحقیق حاضر تلاشی است برای تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی و تهیه نقشه‌های مربوط که در آن سعی شده ابتدا با توجه به استاندارد شدن بارندگی برای محاسبه این شاخص‌ها، متغیر مکانی بودن آنها مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله بعد روش‌های مختلف زمین‌آمار شامل روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ، TPSS با و بدون متغیر کمکی و میانگین متحرک وزن‌دار (WMA) برای تحلیل مکانی آنها مورد ارزیابی واقع شود. پایش خشکسالی براساس شاخص‌های SPI و EDI با استفاده از آمار و اطلاعات ۴۳ ایستگاه در سطح استان تهران انجام و سپس نقشه‌های خشکسالی تهیه و ارزیابی شده است. نتایج تحقیق ضمن تأیید متغیر مکانی بودن شاخص‌ها، نشان داد که هر چند روش کریجینگ از دقت بالاتری برخوردار بوده است ولی با لحاظ نمودن سرعت عمل و استفاده از این نتایج در سیستم‌های پایش فعال، روش میانگین متحرک وزن‌دار نیز دقت کافی را دارا است.

**کلمات کلیدی:** خشکسالی، زمین‌آمار، SPI، EDI، کریجینگ، میانگین متحرک وزن‌دار، TPSS

1. M.S. Student Water Structures, Tarbiat Modarres University Tehran, Iran  
2. Assistant Professor, Soil conservation And Watershed Management Research Institute  
3. Assistant Professor, Tarbiat Modarres University Tehran, Iran.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس  
۲. استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور  
۳. استادیار، دانشگاه تربیت مدرس

با وجود منابع فراوانی که حکایت از ارجحیت روش کریجینگ در تحلیل مکانی دارد، اما در برخی از مقالات نظیر Driks et al. (1998) برای تحلیل مکانی بارندگی، روش‌های میان‌یابی تیسن، عکس مجذور فاصله و کریجینگ را مقایسه و گزارش دادند که با وجود محاسبات بیشتر روش کریجینگ، تغییرات معنی داری نسبت به روش‌های ساده‌تر مشاهده نشده است.

در استفاده از روش‌های کریجینگ، تغییرنا<sup>۵</sup> و تحلیل آن نقش بسیار تعیین کننده‌ای دارد. به عنوان نمونه در تحقیق Dutter و Holawe (1999)، این گونه ادعا شده است که از تغییرنا می‌توان برای دستیابی به تغییرات زمانی بارندگی در کنار تغییرات مکانی آن نیز، استفاده کرد. (Goovaerts 2000) در تحقیق خود روند تغییرات تغییرنا را با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه مطالعاتی تفسیر نمود و همچنین یکسان بودن شکل تغییرناها در ماه‌های مختلف را با وجود متمایز بودن پارامترهای آن، به وجود عوارض یکسان مرتبط دانست. (Skirvin et al. 2003) نیز در تحلیل‌های خود ارتباطی را میان شعاع تاثیر<sup>۶</sup>، آستانه<sup>۷</sup> و همچنین مدل‌های تغییرنا با عوامل توپوگرافی و الگوی‌های بارندگی جستجو کردند.

برای تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی کارهای کمی گزارش شده است که در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های مرکز مقابله با خشکسالی آمریکا (Svoboda, 2004) و مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (Smakhtin, 2004) اشاره داشت که روش عکس فاصله را برای این منظور مناسب تشخیص داده‌اند.

تکنیک دیگری به منظور پایش خشکسالی و تحلیل مکانی آن توسط Vangelis & Tsakiris (2004) ارائه شده است. آن‌ها با استفاده از روش عکس مجذور فاصله، نقشه بارندگی ماهانه و نقشه درصد نرمال متوسط بارندگی سالانه را ترسیم و سپس با این اطلاعات، نقشه توزیع مکانی شاخص SPI<sup>۸</sup> را برای دوره آماری یکساله ۱۹۶۴-۶۵ تهیه کردند.

همان‌گونه که اشاره شد در این تحقیق، تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی مدنظر قرار گرفته است. برای پایش خشکسالی، شاخص‌های متعددی مانند DI<sup>۹</sup>، PN<sup>۱۰</sup>، SPI، CZI<sup>۱۱</sup>، MCZI<sup>۱۲</sup> و EDI<sup>۱۳</sup> معرفی شده است که مرید و همکاران (۱۳۸۳) برای استان تهران که منطقه مطالعاتی این تحقیق نیز هست، شاخص‌های یادشده را بررسی نمودند و در نهایت عملکرد بهتر SPI و EDI را در این منطقه توصیه کردند. لذا این نتیجه‌گیری برای تحقیق حاضر مبنا قرار گرفته و تحلیل مکانی شاخص‌ها صرفاً براساس این دو

سیستم پایش خشکسالی از ابزارهای بسیار مهم در مدیریت خشکسالی محسوب می‌گردد که می‌توان با استفاده از پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی شروع، خاتمه، توسعه مکانی و شدت آن را تشخیص و اعلام نمود. در صورت وجود طرح‌های از پیش آماده برای مقابله با خشکسالی، این سیستم می‌تواند در تعیین نوع و زمان فعال شدن طرح‌ها نقش موثری را ایفاء نماید.

برای بیان کمی این پدیده و همچنین ارزیابی آن در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌گردد که برای محاسبه آن‌ها وجود داده‌های مناسب و طولانی مدت پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی بسیار ضروری است. بارندگی اصلی‌ترین عاملی است که در ایجاد، گسترش و دوام خشکسالی‌ها سهیم می‌باشد، البته پارامترهای اقلیمی دیگری نظیر تبخیر - تفرق نیز می‌تواند بیانگر رفتار خشکسالی در هر منطقه باشد، اما مشکلاتی که برای محاسبه این پارامترها وجود دارد، موجب شده است تا بارندگی به عنوان مناسب‌ترین و قابل دسترس‌ترین پارامتر اقلیمی برای ساخت و محاسبه شاخص‌های خشکسالی شناخته شود. از سوی دیگر هم شاخص‌هایی که تنها بر پایه این متغیر استوار می‌باشند، بیشتر مورد پذیرش جوامع علمی و کاربران قرار گرفته‌اند.

اصولاً اطلاعات نقطه‌ای این شاخص‌ها در ایستگاه‌ها برای پایش خشکسالی کفایت نمی‌کند و بسط و گسترش آن‌ها به صورت مکانی و منطقه‌ای لازم می‌باشد. تحلیل مکانی متغیرهای هواشناسی نظیر دما و بخصوص بارندگی، سابقه طولانی در مطالعات منابع آب دارد که در این راستا روش‌های زمین آمار قابلیت‌های خاصی را از خود بروز داده‌اند. (Goovaerts 2000) در تحقیق خود برای آگارا منطقه‌ای در پرتغال نشان داد که روش‌هایی از زمین آمار نظیر کوکریجینگ<sup>۱</sup> و کریجینگ با روند خارجی<sup>۲</sup> که در آن‌ها ارتفاع به عنوان متغیر کمی استفاده می‌گردد، نسبت به دیگر روش‌ها که تنها داده‌های بارندگی را در محاسبات خود دخالت می‌دهند، نظیر کریجینگ ساده<sup>۳</sup> و عکس مجذور فاصله (WMA)<sup>۴</sup>، عملکرد بهتری را در تخمین از خود نشان می‌دهند. در مطالعات دیگر نظیر تحقیق Sun et al. (2000) نیز این نتایج اتخاذ شده است. آن‌ها روش کوکریجینگ را برای تحلیل مکانی بارندگی به منظور تخمین سیل و برآورد هیدروگراف سیل ورودی به کار برده‌اند. برای تهیه نقشه‌های میانه بارندگی (Touazi et al. 2004) نیز از روش کریجینگ استفاده کرده‌اند.

نواحی شمالی استان از تراکم بیشتری برخوردار هستند. در این تحقیق دوره آماری ۴۹-۱۳۴۸ تا ۸۰-۱۳۷۹ بارندگی مبنا قرار گرفت و داده‌های مربوط مورد تصحیح و تکمیل قرار گرفته‌اند. همچنین اطلاعات مربوط به مقادیر شاخص‌های SPI و EDI از تحقیق مرید و همکاران (۱۳۸۳) تهیه گردید که تنها در ادامه شرح مختصری از چگونگی محاسبه آن‌ها ارائه شده است که جزئیات بیشتر آن از این مرجع قابل وصول است.

## ۲-۱-۲- شاخص‌های SPI و EDI

بسیاری از محققین خشکسالی، به قابلیت انعطاف‌پذیری SPI و قابلیت آن برای هر مقیاس زمانی اذعان داشته‌اند (Hayes, et al, 1998). شاخص SPI برای هر منطقه براساس ثبت بارندگی‌های طولانی مدت آن محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب، بر آمار بلند مدت بارندگی‌ها برازش داده می‌شود. سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد، بطوریکه استاندارد شده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره مورد نظر صفر شود (Edwards and Mckee, 1997). مقادیر مثبت SPI نشان دهنده بارندگی بیشتر از بارش متوسط و مقادیر منفی آن معنای عکس را دارد. طبق این روش دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت گردد. برای محاسبه این شاخص از فرمول ذیل استفاده می‌گردد.

$$SPI_n = \frac{[P_0 + \sum(P_{-i}) - \mu_n]}{\delta_n} \quad (1)$$

شاخص انجام گرفته شده است. در این مقاله، تلاش بر آن بوده که ابتدا شاخص‌های خشکسالی از دیدگاه یک متغیر مکانی مورد بررسی قرار گیرد تا بعد از احراز این شرط، از روش‌های زمین آماری شامل کریجینگ معمولی<sup>۱۴</sup>، WMA و TPSS<sup>۱۵</sup> برای تحلیل مکانی آن‌ها و رسم نقشه‌های ماهیانه خشکسالی استفاده و عملکرد آن‌ها ارزیابی گردد. ارائه نتایج نیز براساس سال‌های ۸۰-۱۳۷۷ بوده که خشکسالی شدیدی بر استان تهران حاکم بود.

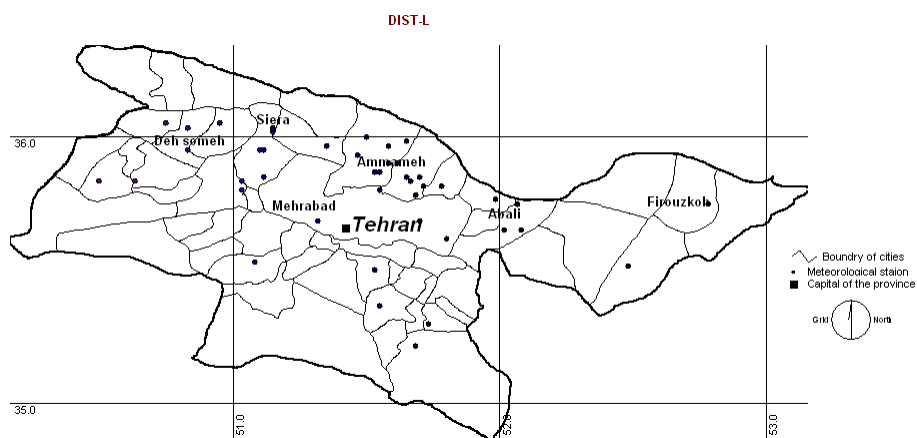
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان تهران با وسعت حدوداً ۱۷ هزار کیلومتر مربع، به دلیل جایگاه ویژه آن و همچنین خساراتی که طی خشکسالی‌های اخیر متحمل شده، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. نواحی شمالی این استان در دامنه‌های جنوبی سلسله جبال البرز قرار گرفته که ارتفاع آن تا ۵۰۰۰ متر در نواحی شرق افزایش پیدا می‌کند. مقادیر بارندگی در این استان از ۷۰۰ میلی‌متر در نواحی شمالی تا ۱۲۰ میلی‌متر در نواحی جنوبی متغیر می‌باشد. قسمتی از نتایج این تحقیق براساس ۵۵ منطقه موجود در استان تهران ارائه شده است که محدوده هر یک از این مناطق در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

### ۲-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

در این استان، سازمان هواشناسی و وزارت نیرو جمعاً ۱۳۰ ایستگاه هواشناسی را تحت نظارت و کنترل خود دارند که از این تعداد تنها ۴۳ مورد آن با توجه به طول دوره آماری مورد نظر که ۳۰ سال بوده، برای این تحقیق مناسب تشخیص داده شد. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ آمده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، ایستگاه‌ها در



شکل ۱- محدوده جغرافیایی استان تهران همراه با موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده و مرز شهرها

که در آن  $n$  = تعداد ماههائی که بارندگی تجمعی برای آنها حساب شده است،  $P_0$  = مقدار نرمال شده بارندگی ماه فعلی،  $P_i$  = مقدار نرمال شده بارندگی ماه قبل،  $\mu_n$  = میانگین تعداد بارندگی تجمعی برای  $n$  ماه و  $\delta n$  = انحراف معیار برای ماهها می باشد.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (3)$$

که در آن:  $\gamma(h)$  مقدار تغییرنا در فاصله  $h$ ،  $h$  فاصله بین نقاط نمونه برداری شده،  $n$  تعداد جفت نقاطی که در یک راستا به فاصله  $h$  از یکدیگر قرار دارند،  $Z(x_i)$  مقدار متغیر در نقطه  $x_i$  و  $Z(x_i + h)$  مقدار متغیر در نقطه  $(x_i + h)$  می باشد. لازم به ذکر است که  $\gamma(h)$  در واقع به دلیل دارا بودن ضریب  $\frac{1}{2}$  نیم تغییرنا<sup>۱۷</sup> می باشد اما در مراجع برای اختصار آن را تغییرنا نامیده اند (Issaks and Srivastava, 1989).

تغییرنا رابطه بین فاصله و واریانس دادهها را نشان می دهد و با سه پارامتر استخراج شده از آن می توان تغییرات مکانی متغیر را مورد بررسی قرار داد.

پارامتر آستانه که بیشترین مقدار تغییرنا را به خود اختصاص می دهد، در واقع همان واریانس مکانی متغیر مورد بررسی است. دامنه تأثیر بیانگر شعاع همبستگی نقاط با یکدیگر می باشد و در خارج این فاصله رفتار نقاط تصادفی خواهد بود. پارامتر اثر قطعه‌ای<sup>۱۸</sup> واریانس خطای نمونه برداری را نشان می دهد و همچنین مشخصه تصادفی بودن متغیر مورد بررسی است. (حسنی پاک، ۱۳۷۷)

برای این تحقیق تغییرنا برای راستاهای اصلی صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه ترسیم گردید تا راستائی که در آن بیشترین همبستگی مکانی وجود دارد، مشخص گردد. با توجه به وجود ناهمسانگردی (به علت متفاوت بودن آستانه و شعاع تأثیر در راستاهای مختلف) از تغییرنمای همه جانبه<sup>۱۹</sup> که بیانگر متوسط تغییرات متغیر در تمام راستاها می باشد، برای تشریح پیوستگی مکانی استفاده شده است.

### ۲-۳-۲- روش‌های میان یابی زمین آمار

در زمین آمار از یک رابطه عمومی برای محاسبه مقدار متغیر در یک نقطه مجهول استفاده می شود. اختلاف میان روشها در محاسبه فاکتور وزنی  $\lambda$  است که به نقاط اطراف نقطه مورد نظر داده می شود. رابطه فوق به شرح زیر تعیین می گردد:

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

شاخص خشکسالی موثر (EDI) یک شاخص جدید می باشد. این شاخص توسط بویان از دانشگاه ملی پوکیانگ در سال ۱۹۹۶ ارائه گردید (Byun, and Wilhite, 1996). EDI به طور روزانه خشکسالی را پایش می کند که این قابلیت در شاخصهای قبلی وجود نداشت. اصلیترین مفهوم در این شاخص بارش موثر (EP)<sup>۱۶</sup> است. EP جمع مقادیر بارش روزانه با یک تابع کاهشی وابسته به زمان می باشد. به عبارت دیگر EP هر روز، تابعی از بارندگی همان روز و یک دوره ماقبل خود بوده که در آن بارشهای اخیر نسبت به بارشهای قدیمی تر وزن بیشتری را دارند. برای محاسبه EP از فرمول ذیل استفاده می گردد (Byun and Wilhite, 1999).

$$EP_i = \sum_{n=i}^i [(\sum_{m=1}^n P_m) / n] \quad (2)$$

### ۲-۳-۳- مبانی تحلیل مکانی

به منظور بسط و گسترش اطلاعات نقطه‌ای با توجه به نمونه برداریهای انجام شده و همچنین تغییرات زمانی و مکانی هر متغیر، نیاز به مدل‌هایی است که بتوان رفتار متغیر مورد بررسی را در نقاط مجهول شبیه سازی نمود. در برخی از این مدلها نظیر تیسسن، صرفاً بر اساس مقادیر متغیر و با فرض استقلال آنها، تخمین آنها در موقعیت‌های مجهول صورت می گیرد. در نوع دیگری از مدل‌های احتمالاتی که به آنها روش‌های زمین آمار اطلاق می شود (مانند کریجینگ، کوکریجینگ، TPSS و WMA) اطلاعات و موقعیت مکانی دادهها نیز در محاسبات وارد می گردند و سعی می شود تا رابطه‌ای نیز بین آنها تعریف گردد. معمولاً این ارتباط و همبستگی بین نمونهها به صورت یک مدل ریاضی ارائه می شود تا از این طریق بتوان تغییرپذیری را شبیه سازی نمود. بنابراین، این نوع روشها برای متغیرهایی کاربرد دارند که بتوان برای آنها، همبستگی مکانی را تعریف نمود. ابزارهایی مختلفی برای بررسی این همبستگی وجود دارد که می توان به عنوان نمونه به تغییرنا اشاره نمود. (Issaks and Srivastava, 1989)

### ۲-۳-۱- تغییرنا

بنا بر آنچه ذکر شد، برای مدل نمودن همبستگی مکانی متغیرهای مورد بررسی از تغییرنا استفاده گردید. نقاط این نمودار براساس زوج

## ۲-۴- معیارهای ارزیابی

ارزیابی روش‌ها نیز در این قسمت با استفاده از تکنیک Cross-Validation با معیارهای خطاگیری  $MAE^{(1)}$  و  $MBE^{(2)}$  صورت گرفته است:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (8)$$

که در آن‌ها:  $MAE$  میانگین قدرمطلق خطا (دقت)،  $MBE$  میانگین خطای انحراف (انحراف)،  $n$  تعداد متغیر مشاهده شده و  $Z^*(x_i)$  و  $Z(x_i)$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و مشاهده شده متغیر  $x$  در نقطه  $i$  می‌باشد. علاوه بر استفاده از معیار فوق، وضعیت نقشه‌های تولید شده و روند منطقی آن نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در ادامه مقاله ارائه شده است

## ۳- نتایج و بحث

همان گونه که قبلاً اشاره شد، خشکسالی شدیدی برای سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۰-۱۳۷۹ در سطح استان تهران بوقوع پیوست و برای این تحقیق کلیه ماه‌های این دوره مورد ارزیابی قرار گرفت. ولی به منظور جلوگیری از تطویل مقاله، بیشتر نتایج ۷۸-۱۳۷۷ ارائه شده است، ضمن این که در مجموع نتایج برای هر سه سال یکسان و مؤید جمع‌بندی‌های ارائه شده هستند.

### ۳-۱- مکانی بودن شاخص‌های خشکسالی و تحلیل تغییر نما

در ابتدای این بخش به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود که آیا می‌توان شاخص‌های خشکسالی  $SPI$  و  $EDI$  را متغیر مکانی در نظر گرفت؟ بدین منظور تغییرنمای آن‌ها برای ماه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که برای نمونه تغییرنمای آبان و بهمن ماه سال ۱۳۷۷ منطقه مطالعاتی برای این دو شاخص و همچنین برای مقادیر بارندگی به عنوان یک متغیر مکانی در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است. همانگونه که از اشکال ملاحظه می‌گردد، پیوستگی مکانی حفظ شده، به طوری که با افزایش فاصله، واریانس زیاد شده است. همین روند کم و بیش برای سایر ماه‌ها نیز برقرار بود. لذا، استاندارد شدن بارندگی طی فرآیند محاسبه شاخص‌ها، متغیر مکانی بودن آن را تحت شعاع قرار نداده است و بر این اساس می‌توان از روشهای زمین آماری مورد اشاره در این تحقیق برای تحلیل مکانی آنها بهره جست.

که در آن:  $Z^*(x_i)$  مقدار برآورد متغیر،  $\lambda_i$  مقدار وزن‌های نقاط مشاهده شده و  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده شده متغیر مورد بررسی است. شرط اساسی در این رابطه این است که باید مجموع وزن‌ها در برآورد یک نقطه برابر واحد باشد.

کریجینگ تخمین گری ناریب، با کمترین مقدار واریانس تخمین می‌باشد. کوکریجینگ همان روش کریجینگ است که از یک متغیر کمکی برای تخمین استفاده می‌کند. برای محاسبه اوزان در این روش‌ها از مدل برازش داده شده بر تغییرنما استفاده می‌شود. در روش کریجینگ داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند. (Issaks and Srivastava, 1989, Johnston, et al. 2001) (حسینی پاک، ۱۳۷۷)

TPSS یک نوع روش عددی میان یابی از نوع اسپلاین<sup>۲۰</sup> است و واتسون (1984) ثابت کرد که TPSS نوعی کریجینگ می‌باشد. همچنین می‌تواند همانند روش کریجینگ، براساس یک متغیر کمکی، تخمین را انجام دهد. در این روش برای محاسبه  $\lambda$  از تابع کوواریانس زیر استفاده می‌شود که این امکان وجود دارد تا برای محاسبه آن، توان‌های مختلفی را بکار برد:

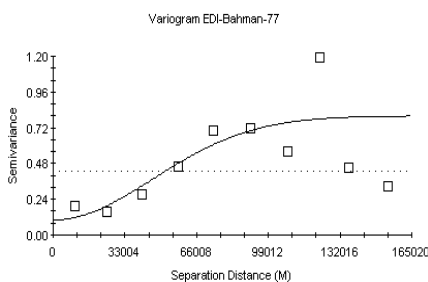
$$C(h) = h^k \log(h) \quad (5)$$
$$k = m - 1$$

که در آن:  $C(h)$  تابع کوواریانس،  $h$  فاصله بین نقاط و  $m$  درجه مشتق نسبی تابع در نقاط مشاهده‌ای می‌باشد.

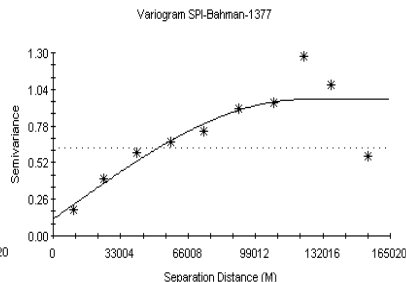
روش WMA بر اساس تعداد نقاط همسایگی و فاصله آن‌ها تا نقطه مجهول و همچنین توانی که بیانگر تاثیر هر ایستگاه می‌باشد، به تخمین پارامتر مورد نظر می‌پردازد. در این روش مقدار  $\lambda$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-u}}{\sum_{d_i \leq R} d_i^{-u}} \quad (6)$$

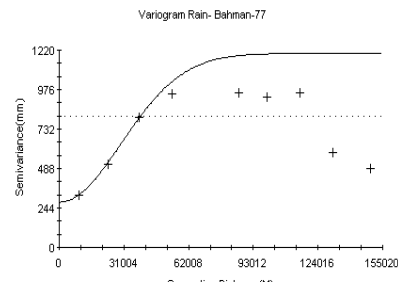
که در آن:  $d_i$  فاصله داده مشاهده شده  $i$ ام تا نقطه مورد تخمین،  $u$  توان مثبت و  $R$  شعاع تأثیر می‌باشد.



شکل ۲-ج: تغییرنا EDI

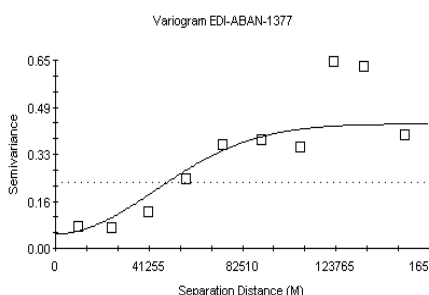


شکل ۲-ب: تغییرنا SPI

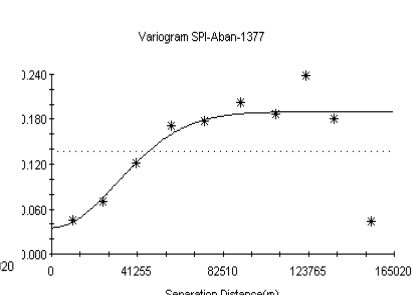


شکل ۲-الف: تغییرنا بارندگی

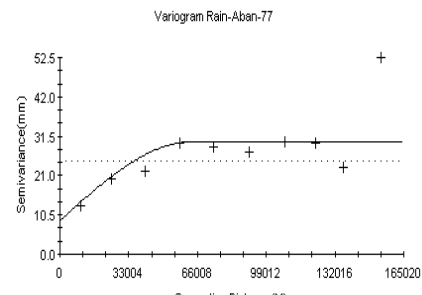
### شکل ۲- تغییرنا متغیرهای بارندگی، SPI و EDI برای بهمن ماه ۱۳۷۷



شکل ۳-ج: تغییرنا EDI



شکل ۳-ب: تغییرنا SPI



شکل ۳-الف: تغییرنا بارندگی

### شکل ۳- تغییرنا متغیرهای بارندگی، SPI و EDI برای آبان ماه ۱۳۷۷

(حسنی پاک، ۱۳۷۷). ملاحظه می‌گردد که برای اکثر ماهها اثر قطعه‌ای نسبی زیر ۰/۵ می‌باشد.

#### ۳-۲- تحلیل مکانی

روش‌های زمین آماری مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای لازم به منظور تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی تفسیر و استخراج شده اند.

برای روش کریجینگ معمولی، نرمال نمودن داده‌ها از شرایط اولیه است که از طرق مختلف نظیر روش BOX-COX (McMahon, 1986) این تبدیل انجام شد. هرچند برای ماه‌هایی همچون فروردین ۱۳۷۷ این کار میسر نشد و روش کریجینگ کارایی لازم را نداشته است. همچنین نتایج تحلیل‌های واریوگرافی، مقدمه‌ای برای استفاده از این روش بود که کار گسترده‌ای برای تهیه و تفسیر آنها صورت گرفت. برای این روش، تعداد نقاط همسایگی برابر ۱۶ در نظر گرفته شد.

در ادامه مدل تئوریک تغییرنمای شاخص‌ها تهیه گردید و از میان مدل‌های کروی، نمائی، خطی و گوسی، با استفاده از تکنیک Cross-Validation و معیارهای خطا MAE و MBE، مدل مناسب انتخاب شد. در این راستا با برازش مدل‌ها و تغییر پارامترهای مختلف مربوط، تحلیل مکانی نقاط با استفاده از روش کریجینگ معمولی صورت پذیرفته و سپس معیارهای خطاگیری بر طبق تکنیک Cross-Validation برای آنها محاسبه شد. نهایتاً با مقایسه مقادیر خطا مناسب‌ترین آنها برگزیده گردید. به عنوان نمونه در شکل ۲ و ۳، مدل‌های گوسی و کروی بهترین نتایج را دربرداشته اند. در جدول ۱ نیز پارامترهای تغییر نما برای این دو شاخص در سال آماری ۱۳۷۷-۷۸ به صورت ماهانه ارائه شده است. در تفسیر پارامترها، اثر قطعه‌ای نسبی<sup>۲۳</sup> که مشخصه تصادفی بودن متغیر مورد بررسی است بیشترین کاربرد را دارد (Litaor, et al, 2003). این پارامتر حاصل تقسیم دو مقدار اثر قطعه‌ای بر آستانه است. در شرایطی که این حاصل بزرگتر از ۰/۵ باشد، می‌توان گفت تاثیر جزء تصادفی متغیر بیش از جزء ساختاردار آن است و تخمین آن با روش‌های زمین‌آماری به صورت محدودتری امکان پذیر خواهد بود

جدول ۱- پارامترهای مدل‌های تغییرنا برای دو شاخص SPI و EDI در دوره آماری ۱۳۷۷-۷۸

EDI					SPI				مشخصات ماه
( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )		
۰/۲۲	۶۰	۰/۸۸	۰/۱۹		۰/۰۵	۱۵۰	۰/۱۸۵	۰/۰۱	
۰/۱۲	۶۲	۰/۴۳	۰/۰۵	"	۰/۱۸	۴۵	۰/۱۹	۰/۰۳۵	
۰/۱۳	۷۲	۰/۳۶	۰/۰۴۵	"	۰/۴۱	۳۸	۰/۵۵	۰/۲۲۴	
					۰/۲۹	۶۰	۰/۳۴	۰/۱	
۰/۱۳	۶۵	۰/۸	۰/۱	"	۰/۱۲	۱۲۲	۰/۹۶۹	۰/۱۱۸	
۰/۱	۵۲	۱	۰/۱	"	۰/۲۱	۷۰	۰/۸۵	۰/۱۸	
۰/۰۸	۵۷	۰/۰۴	۰	"					
۰/۱۹	۶۶	۰/۰۳	۰/۰۱	"	۰/۰۰	۲۵	۰/۳۳۶	۰	
۰/۱	۱۲۲	۰/۰۳	۰		۰/۰۰	۲۵	۰/۱۴۳	۰/۰۰۱	
۰/۲	۶۲	۰/۰۳	۰/۰۱		۰/۵۰	۲۲	۰/۲۵۲	۰/۱۲۷	
۰/۱۶	۶۵	۱/۱	۰/۱۸	"	۰/۳۳	۳۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	
۰/۱۸	۶۰	۰/۰۳	۰/۰۱	"	۰/۸۸	۴۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	

که بیشترین نوسانات MBE را نیز به خود اختصاص داده است. روش کریجینگ با وجود این که در دومین رتبه از نظر دقت قرار دارد، در تخمین‌های خود کمترین انحراف را دارا می‌باشد و همچنین این مزیت را دارد که انحراف یکنواختی را برای کلیه ماه‌ها موجب شده است. روش WMA با دقتی مشابه با روش کریجینگ، شاخص‌های خشکسالی را برآورد نموده است. حال اگر MAE به عنوان فاکتور اصلی در انتخاب روش‌ها در نظر گرفته شود، می‌توان روش TPSS را گزینه برتر از لحاظ تئوریک به شمار آورد. اما اگر هر دو معیار توأم مدنظر باشند، در این صورت روش کریجینگ مناسب‌تر از سایر روش‌ها عمل کرده است. در مورد EDI نیز مشابه قبل بود و روش TPSS کمترین خطا را به دنبال داشت، اما همچنان کمترین انحراف را روش کریجینگ به خود اختصاص داد.

اما برای روش دوم، نقشه‌های شاخص‌های خشکسالی با روش‌های مختلف ترسیم شد تا از لحاظ کیفی نیز مقایسه لازم صورت گیرد که این گونه مقایسه کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. اشکال ۴ و ۵ به ترتیب نقشه‌های شاخص SPI و EDI را با روش‌های زمین آمار برای بهمن ماه ۱۳۷۷ نشان می‌دهند. روش‌های کریجینگ (شکل ۴ و ۵-الف) و میانگین متحرک وزن دار (شکل ۴ و ۵-ج) تقریباً شرایط مشابهی را از نظر خشکسالی در محدوده منطقه مطالعاتی نشان می‌دهند. در صورتی که روش TPSS (شکل ۴ و ۵-ب) شرایط متفاوتی را با روش‌های قبل ارائه داده است.

علاوه بر روش کریجینگ معمولی، روش کوکریجینگ که از یک متغیر کمکی (در اینجا ارتفاع) بهره می‌جوید، نیز ارزیابی شد که به دلیل همبستگی ضعیف آن با شاخص‌ها (حداکثر ۰/۲)، استفاده‌ای از آن به عمل نیامد. روش TPSS با توان‌های ۲ و ۳ با و بدون متغیر کمکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌های انجام شده نشان داد که در اکثر ماه‌ها توان ۲ موجب حداقل خطا (MAE) و انحراف (MBE) در تخمین مقادیر می‌شود. استفاده از متغیر کمکی ارتفاع نیز در این روش میسر نشد.

برای روش میانگین متحرک وزن دار (WMA)، انتخاب دو پارامتر تعداد نقاط همسایگی و توان لازم می‌باشد که در این تحقیق تعداد ایستگاه‌هایی که در تخمین هر نقطه مجهول به کار می‌رود، از مجموعه {۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲} ایستگاه انتخاب گردید و توان‌های مورد ارزیابی نیز ۲، ۳ و ۴ بوده است. بررسی‌ها نشان داد که تعداد ۶ ایستگاه و توان ۲ بالاترین دقت و کمترین انحراف (MAE و MBE) را دارند.

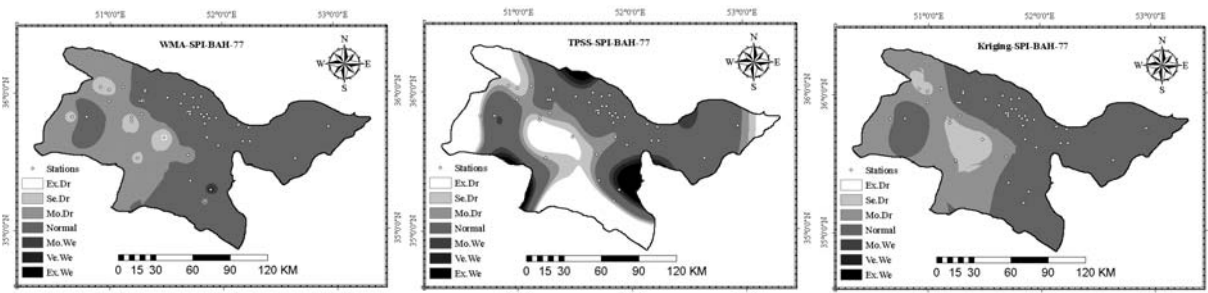
**۳-۳- مقایسه و ارزیابی روش‌های کریجینگ، WMA و TPSS**  
برای این تحقیق، ارزیابی روش‌های فوق به دو شکل انجام گرفت. در روش اول، ملاک مقایسه معیارهای خطاگیری MAE و MBE بوده که میزان خطا و انحراف مقادیر تخمینی روش‌ها را نسبت به مقادیر واقعی نشان می‌دهند (جدول ۲). براساس روش اول و برای شاخص SPI، کمترین خطا به روش TPSS تعلق دارد، در صورتی

جدول ۲- ارزیابی روش‌ها در برآورد شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI برای سال ۱۳۷۷-۷۸

شاخص	EDI						SPI					
	MBE			MAE			MBE			MAE		
	TPSS-2	WMA-2	Kriging	TPSS-2	WMA-2	Kriging	TPSS-2	WMA-2	Kriging	TPSS-2	WMA-2	Kriging
مهر	-۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۶	۰/۵۳	-۰/۰۷	۰	۰	۰/۱۴	۰/۲	۰/۱۶
آبان	-۰/۰۹	۰	۰/۰۳	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۳۴	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۲	۰/۲۴	۰/۲۳
آذر	-۰/۰۵	-۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۲۷	-۰/۰۶	-۰/۰۱	-۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۲۹
دی	۰/۰۴	۰/۰۱		۰/۲۹	۰/۳۳		۰	-۰/۰۲	۰	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۴
بهمن	-۰/۰۹	-۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۳۸	۰/۵۳	۰/۴۹	-۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۳
اسفند	-۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۵۷	-۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۵۳
فروردین	-۰/۰۸	-۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۴۱	-۰/۰۳	-۰/۰۳		۰/۴۴	۰/۵۹	
اردیبهشت	-۰/۱۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۴۹	-۰/۱۲	۰	-۰/۰۳	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۴۱
خرداد	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۵	۰	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۲
تیر	-۰/۱۲	-۰/۰۳	-۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۵	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۲
مرداد	-۰/۱۵	-۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۵	۰/۵۹	۰/۵۴	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۳۶
شهریور	-۰/۱۴	-۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۷۴	۰/۵۳	۰/۵	۰/۰۱	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۲

مقایسه برون یابی که به وسیله روش TPSS صورت گرفته است (شکل ۶) در مقایسه با برون یابی روش کریجینگ (شکل ۷) نشان می‌دهد، تنها در قسمت‌های شمالی استان که پراکنش ایستگاه‌ها از توزیع خوبی برخوردار است، این دو روش درون یابی مشابهی را انجام داده‌اند، اما در برون یابی خیلی متفاوت از یکدیگر عمل کرده‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که برآوردهای انجام شده به وسیله روش کریجینگ به واقعیت نزدیک تر بوده است. در شکل ۸ نیز برون یابی توسط روش WMA نشان داده شده که بیانگر شباهت آن با روش کریجینگ (شکل ۷) می باشد.

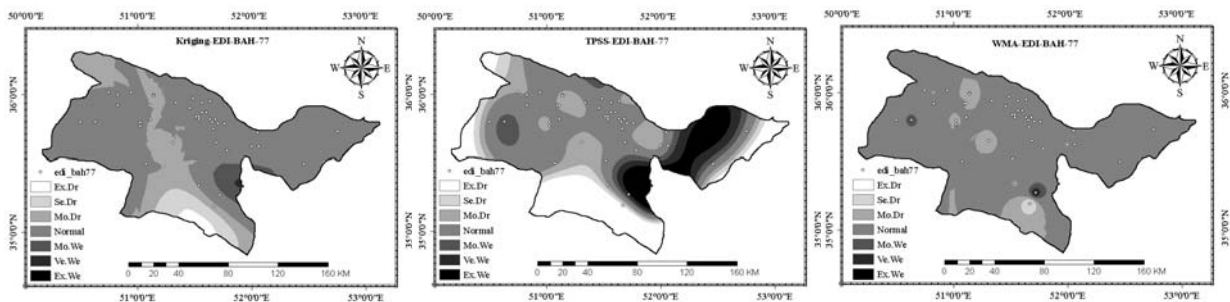
این روش علی رغم نتایج مثبت در مقادیر MAE، نقشه‌هایی ارائه داده که از روند و تغییرات منطقی برخوردار نبودند و نا هماهنگی در آن بخصوص در مرزهای استان و مناطقی که فاقد ایستگاه هستند، قابل مشاهده است. در توجیه این موضوع می‌توان این را ذکر کرد که این روش نتوانسته برون یابی مناسبی را انجام دهد، به گونه‌ای که در بخشی از مرزهای استان که تراکم ایستگاهها ضعیف می‌باشد، تغییرات شدید را در برآورد طبقات خشکسالی را شاهد می‌باشیم. مانند بهمن ماه ۱۳۷۷ که شرایط بسیار شدید خشکسالی تا بسیار مرطوب را این روش گزارش کرده است. به علاوه، همین گونه رفتارهای غیر همسان و یکنواخت را می‌توان از یک ماه تا ماه بعدی نیز مشاهده کرد.



الف: روش کریجینگ معمولی      ب: روش TPSS      ج: روش WMA

شکل ۴- نقشه SPI بهمن ۱۳۷۷ با استفاده از روش‌های مختلف زمین آماری





ج: روش WMA

ب: روش TPSS

الف: روش کریجینگ معمولی

شکل ۵- نقشه EDI بهمن ۱۳۷۷ با استفاده از روش‌های مختلف زمین آماری

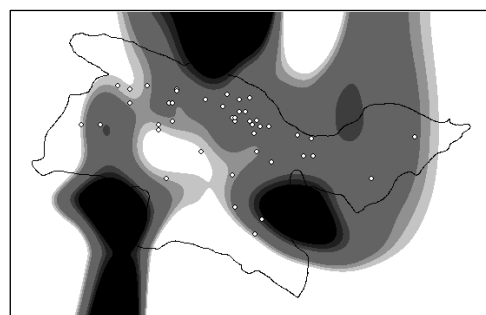
### ۳-۴- مقایسه طبقات خشکسالی در محدوده شهرستان‌های استان

از جمله اهداف تهیه نقشه‌های خشکسالی در این تحقیق، اعلام وضعیت آن در شهرستان‌های استان می‌باشد که این طبقات براساس مرزهای آنها که در شکل ۱ نشان داده شده بود، محاسبه گردید (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). مقایسه بدین شکل با دو هدف انجام شد: یکی مقایسه عملکرد روش‌ها (علی رغم نتایج نامطلوب TPSS، مجدداً در این قسمت بررسی گردید) و دیگری از بعد اجرایی آن بوده که چنانچه از روش WMA که دارای محاسبات بسیار ساده تری نسبت به روش کریجینگ است، استفاده شود، تا چه اندازه دقت کاهش خواهد یافت. این مقایسه برای تمامی ماه‌های دوره خشکسالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ انجام شد که نمونه آن برای ماه‌های بهمن ۱۳۷۷ و مرداد ۱۳۷۸ بر اساس شاخص‌های EDI و SPI در اشکال ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده هماهنگی دو روش WMA و کریجینگ می‌باشد و مجدداً تفاوت آنها با TPSS کاملاً مشهود است.

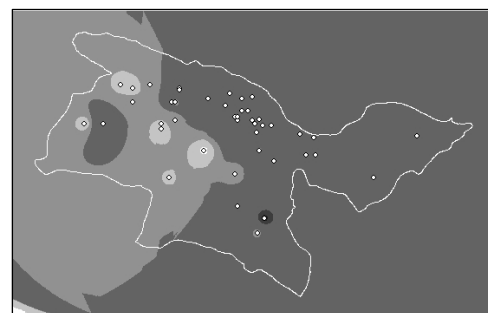
### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق روش‌های کریجینگ، WMA و TPSS برای تهیه نقشه‌های شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI در استان تهران مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر قابل ارائه است:

- آنالیز واریوگرافی شاخص‌های خشکسالی EDI و SPI نشان داد که EDI نسبت به SPI از همبستگی مکانی بهتری برخوردار است. علت این امر را می‌توان به ویژگی شاخص EDI نسبت داد که از وجود حافظه‌ای که مبین بارندگی‌های گذشته است، برخوردار می‌باشد و این امر از تغییرات سریع که تنها تابع مقطع زمانی حال می‌باشد، جلوگیری می‌کند.



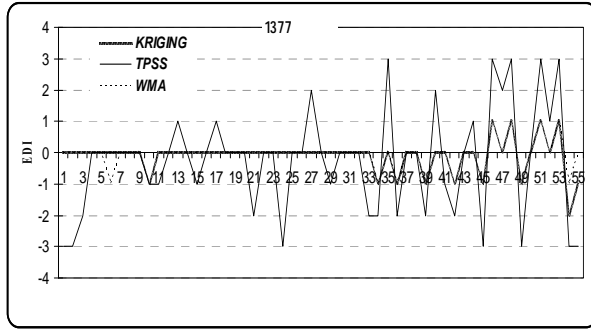
شکل ۶- وضعیت برون یابی روش TPSS



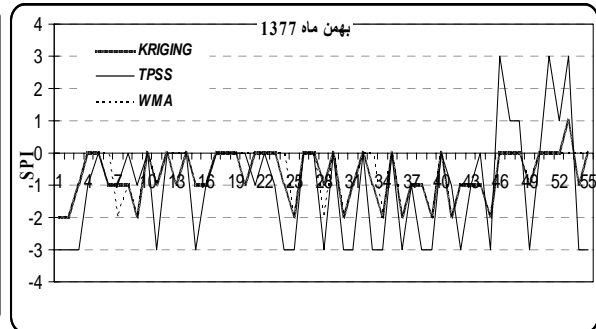
شکل ۷- وضعیت برون یابی روش کریجینگ معمولی



شکل ۸- وضعیت برون یابی روش WMA

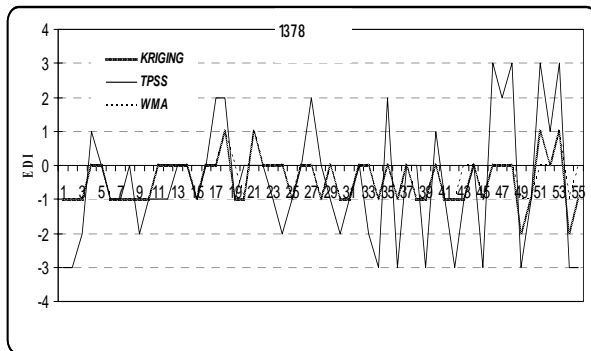


ب: براساس شاخص EDI

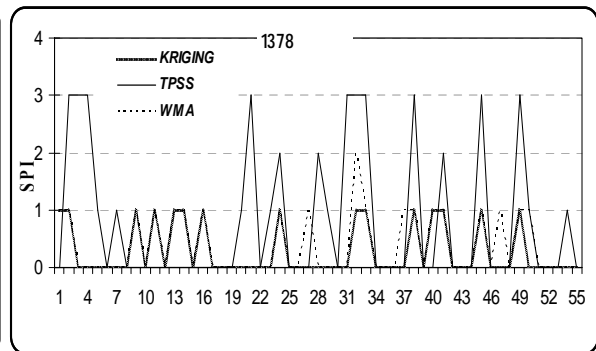


الف: براساس شاخص SPI

شکل ۹- مقایسه طبقات خشکسالی شاخص های SPI و EDI براساس روشهای مورد بررسی در محدوده شهرستانهای استان (بهمن ماه ۱۳۷۷)

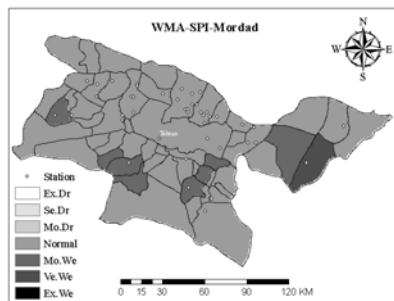


ب: براساس شاخص EDI

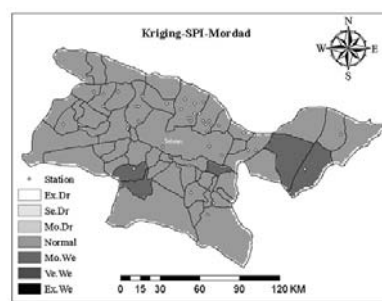


الف: براساس شاخص SPI

شکل ۱۰- مقایسه طبقات خشکسالی شاخص های SPI و EDI براساس روشهای مورد بررسی در محدوده شهرستانهای استان (مرداد ماه ۱۳۷۸)

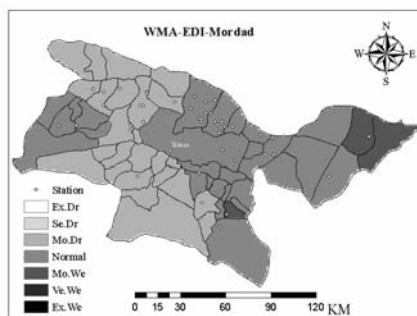


ب: روش WMA

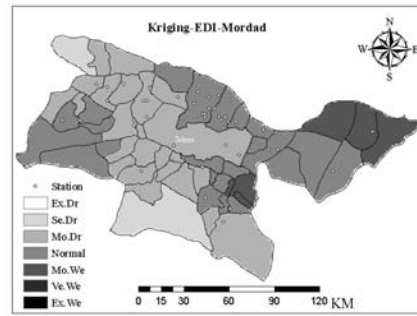


الف: روش کریجینگ

شکل ۱۱- نقشه SPI مرداد ۱۳۷۸ با استفاده از روش های برتر



ب: روش WMA



الف: روش کریجینگ

شکل ۱۲- نقشه EDI مرداد ۱۳۷۸ با استفاده از روش های برتر

## ۶- مراجع

حسینی پاک، ع. ا. (۱۳۷۷)، "زمین آمار (ژئواستاتستیک)", انتشارات دانشگاه تهران، ۳۴۱ص.

مرید، س.، قائمی، ه.، مقدسی، م. و پایمزد، ش. (۱۳۸۳)، "طرح تحقیقاتی طراحی سیستم پایش خشکسالی استان تهران"، وزارت نیرو.

Byun, H.R. and Wilhite, D.A., (1996), "Daily quantification of drought severity and duration" <http://rossby.metr.ou.edu/byun.html>

Byun, H.R. and Wilhite, D.A., (1999), "Objective quantification of drought severity and duration", *Journal of Climate.*, 12, pp.2747-2756

Driks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., and Harris, D. (1998), "High resolution studies of rainfall on Norfolk Island. Part II: Interpolation of rainfall data", *Journal of Hydrology, Amsterdam*, 208 (3-4), pp. 187-193.

Edwards, D.C. and Mckee, T. B. (1997), "Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales" Climatology Report Number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Goovaerts, P. (2000), "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall", *Journal of Hydrology*, 228, pp. 113-129.

Hayes, M.J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A. and Vanyarkho, O.V. (1998), "Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index", *Bulletin of American Meteorological Society*, 80, pp. 429-438.

Holawe, F., and Dutter, R. (1999), "Geostatistical study of precipitation series in Austria: Time and Space", *Journal of Hydrology*, 219, pp. 70-82.

Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. and Lucas, N. (2001), "Using ArcGIS Geostatistical Analyst" New York, USA, 309 pp.

Litaor, M. I., Reichmann, O., Belzer, M., Auerswald, K., Nishri, A., and M. Shenker, M. (2003), "Spatial Analysis of Phosphorus Sorption Capacity in a Semiarid Altered Wetland", *Journal of Environ. Qual.*, 32, pp. 335-343.

Issaks. E. H. and Srivastava, R.M. (1989), "Applied geostatistics", New York, Oxford University Press, 561 pp.

McMahon, T.A. (1986), "River and reservoir yield", Water resources publications, 56 pp.

- در مجموع تراکم ایستگاهها در سطح استان یکسان نبوده و به خصوص در سمت جنوب و شرق این کمبود بیشتر محسوس بوده است. روش TPSS به این کاستی در مقایسه با دو روش دیگر حساسیت بیشتری را نشان داد که در مقایسه نقشهها به وضوح مشخص شد و این در حالی بود که از نظر معیارهای خطاگیری نتایج خوبی را این روش در بردارد.

- روش کریجینگ در نهایت جوابهای قابل قبولی را ارائه داد، ولی با محدودیتهائی نظیر عدم نرمال شدن ماههائی از سال، همراه بود. روش WMA از بعد اجرایی و توصیه برای سیستم پایش خشکسالی که از مراحل کمتر و سرعت بالاتری برخوردار است مورد ارزیابی قرار گرفت که مقایسه آن با روش کریجینگ نتایج نزدیکی را به همراه داشت.

- در اعلام وضعیت خشکسالی مناطق، تنها شاخص خشکسالی نقش ندارد و با همان اهمیت، روشی که برای تحلیل مکانی استفاده می شود، نیز اهمیت دارد.

## ۵- تشکر

مؤلفان از همکاری ارزشمند خانم مهندس سیما رحیمی بندرآبادی و خانم مهندس مهنوش مقدسی تشکر و قدردانی دارند.

## پی نوشتها

1. Co-Kriging
2. Kriging with an External Drift
3. Simple Kriging
4. Weighting Moving Average
5. Variogram
6. Range
7. Sill
8. Standardized Precipitations Index
9. Deciles Index
10. Percent of Normal
11. China Z Index
12. Modified China Z Index
13. Effective Drought Index
14. Ordinary Kriging
15. Thin Plate Smoothing Splines
16. Effective Precipitation
17. Semivariogram
18. Nugget effect
19. Omnidirectional Variogram
20. Splines
21. Mean Absolute Error
22. Mean Bias Error
23. Relative nugget effect

- Svoboda, M. (2004), "National Drought Mitigation Center, USA, Personal communication.
- Tsakiris, G., and Vangelis, H. (2004), "Towards a drought watch system based on spatial SPI", *Water Resources Management*, 18, pp. 1-12.
- Touazi, M., Laborde, J. P., and Bhiry, N. (2004), "Modeling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria", *Journal of Hydrology*, 296, pp. 179-191.
- Watson, G. S., (1984), "Smoothing and interpolation by Kriging and with splines", *Mathematical Geology*, 16(6), pp. 601-615
- Morid, S., Ghaemi, H., and Paymazd, Sh., (2004), "Research Project for Designing a Draught Monitoring System for Tehran Province, Iran", Ministry of Energy, Iran.
- Skirvin, S. Stuart, M., Marsh, E., Mcklaran, M. P., and Meko D. M. (2003), "Climate spatial variability and data resolution in a semi-arid watershed, southeastern Arizona", *Journal of Arid Environments*, 54, pp. 667-686.
- Smakhtin, V. (2004), "International Water Management Institute", Sri Lanka, Personal communication.
- Sun, X., Mein, R. G., Keenan, T. D., and Elliott, J. F. (2000), "Flood estimation using radar and rain gauge data", *Journal of Hydrology*, 239, pp. 4-18.

تاریخ دریافت مقاله: ۲ اسفند ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۲۸ خرداد ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴ بهمن ۱۳۸۵