

بررسی ترسالی و خشکسالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود)

مجید منتصری^{۱*}، امیر نوری^۲، جواد بهمنش^۳ و مهدی اکبری^۴

۱. استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه و عضو هیات علمی بخش تحقیقات فنی و

مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، ارومیه، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۴. دانشیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۱۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۲)

چکیده

دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر به دلیل کاهش جریانات ورودی آب از زیرحوضه‌های خود با کاهش شدید حجم آب مواجه شده است. یکی از دلایل خشکی مستمر این دریاچه تغییرات اقلیمی و پدیده خشکسالی است. دو رودخانه زرینه‌رود و سیمینه‌رود از مهم‌ترین زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه هستند و بیش از نیمی از ورودی آب دریاچه را تأمین می‌کنند. در این میان، شناخت ابعاد مختلف پدیده خشکسالی و خصوصیات آماری آن مهم است و نخستین قدم در بررسی و مدیریت منابع آب حوضه و درک بهتر دلایل خشکی دریاچه ارومیه به‌شمار می‌آید. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار اقلیمی حوضه‌های بررسی شده از دیدگاه خشکسالی هواشناسی طی چهار دهه گذشته است. در این تحقیق وضعیت خشکسالی در دو حوضه زرینه‌رود و سیمینه‌رود توسط شاخص بارش استاندارد شده، SPI با استفاده از داده‌های بارش ماهانه ۳۱ ایستگاه در دوره آماری ۱۳۵۰-۱۳۹۳ در مقیاس زمانی سالانه و ماهانه (یک تا ۴۸ ماهه) بررسی شد. دوره‌های ترسالی و خشکسالی و همچنین مقادیر شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف زمانی و به‌صورت منطقه‌ای استخراج شد. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی شاخص بارش استاندارد شده برای سال‌های واقع شده در دوره‌های مهم ترسالی و خشکسالی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ، کوکریجینگ و فاصله معکوس) تهیه و ارزیابی شد. بررسی شاخص SPI طی چهار دهه گذشته، نشان می‌دهد به‌طور کلی زیرحوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه پس از تجربه دو دوره ترسالی و یک دوره خشکسالی، در ۷۰ درصد سال‌ها در شرایط نرمال به‌سر برده‌اند. پس از وقوع خشکسالی متوالی طی دوره ۱۳۷۷-۱۳۸۰ به‌رغم حاکمیت شرایط نرمال تا سال ۱۳۹۳، روند کاهشی تراز دریاچه ارومیه ادامه یافته است که نشان می‌دهد علاوه بر تأثیر شرایط اقلیمی و کاهش بارش‌ها، عوامل دیگری نظیر بهره‌برداری نامناسب و برداشت بیش از حد از منابع آبی در سال‌های اخیر عامل اصلی تشدید بحران در حوضه دریاچه ارومیه بوده است. مقایسه و ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آماری به‌منظور توزیع مکانی شاخص خشکسالی با استفاده از معیار RMSE نشان داد روش کریجینگ دقت زیادی برای پهنه‌بندی خشکسالی دارد.

کلیدواژگان: دریاچه ارومیه، روش‌های زمین‌آمار، زرینه‌رود، سیمینه‌رود، شاخص SPI.

مقدمه

در سال‌های اخیر کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا، افزایش تبخیر و افزایش جمعیت منابع آبی کشور را کاهش و مصرف آنها را افزایش داده است و با کاهش سرانه آب به کمتر از ۱۵۰۰ مترمکعب آب تجدیدشونده، کشور در وضعیت بحران آب قرار قرار گرفته است. از طرفی، به‌رغم خشکسالی‌های مکرر، استفاده بیش از حد از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، توسعه زیرساخت‌های شبکه‌های آبیاری و افزایش چاه‌های عمیق به بحران آب دامن زده و خشک شدن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، تالاب‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش کیفیت منابع آب، افزایش فرسایش خاک و افزایش توفان و گردوغبار در سال‌های اخیر را به همراه داشته است [۱]. وقوع خشکسالی‌ها از ویژگی‌های اصلی آب و هوای خشک و نیمه‌خشک مثل ایران محسوب می‌شود که دائمی نیست [۲]. زاهدی قره‌آغاج و قوبدل رحیمی [۳] نیز با تأیید وقوع پدیده خشکسالی به‌عنوان یکی از واقعیت‌های مهم ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه، علت اصلی آن را در نوسان‌های دوره‌ای اقلیم و عبور نکردن توده هوای مرطوب و باران آور، به‌خصوص توده هوای مرطوب مدیترانه‌ای، دانستند. نخستین بار پالم [۴] خشکسالی را کمبود رطوبت مستمر و غیرطبیعی تعریف کرد که واژه مستمر به استمرار حالت کمبود رطوبت و واژه غیرطبیعی به انحراف نمایه مد نظر از شرایط طبیعی یا میانگین اشاره دارد. به‌طور کلی، خشکسالی در چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی - اجتماعی طبقه‌بندی شده است [۵]. خشکسالی هواشناسی از مهم‌ترین انواع خشکسالی‌ها است که به‌دلیل کمبود یا کاهش مقدار بارندگی طی دوره‌ای از زمان به‌وجود می‌آید و بررسی، پیش‌بینی و برآورد احتمال وقوع آن به‌عنوان سرآغاز پدیده خشکسالی، می‌تواند تا حد بسیار زیادی از خسارت‌های این رخداد طبیعی بکاهد و در مدیریت بحران کمک فراوانی نیز داشته باشد. بارندگی به‌عنوان بی‌ثبات‌ترین متغیر اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که تغییرات آن به‌طور مستقیم در رطوبت خاک، جریان‌های سطحی و زیرزمینی انعکاس می‌یابد. به همین دلیل بارش نخستین عاملی است که می‌تواند در بررسی خشکسالی به‌ویژه خشکسالی هواشناسی مورد توجه قرار گیرد [۶].

برای پایش خشکسالی از شاخص‌های متعددی به‌عنوان شاخص‌های خشکسالی در سراسر جهان استفاده می‌شود [۷].

به‌طور مشخص همه شاخص‌های خشکسالی از بارندگی به‌صورت تک یا هم‌زمان با ترکیبی از سایر المان‌های اقلیمی از جمله دما یا رطوبت خاک استفاده می‌کنند. با توجه به دسترسی آسان به داده‌های بارش در مناطق مختلف دنیا، استفاده از شاخص‌های خشکسالی تک‌پارامتری، مبتنی بر داده‌های بارش رو به افزایش است [۸]. یکی از شاخص‌های توسعه‌یافته بر اساس داده‌های بارش، نمایه بارش استاندارد شده^۱، SPI است. این نمایه در سال ۱۹۹۳ توسط مک‌کی و همکارانش [۹] به‌منظور پایش خشکسالی اقلیمی در مقیاس‌های زمانی مختلف (یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) ابداع شد. نمایه SPI در تعیین کمبود بارش طراحی شده است و به‌منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد [۱۰]. ویژگی دیگر شاخص SPI، امکان تعیین آستانه خشکسالی برای هر دوره زمانی دلخواه است که علاوه بر محاسبه شدت، امکان محاسبه مدت خشکسالی نیز فراهم می‌شود. کیانتاش و دراکوپ [۱۱] ۱۴ شاخص مختلف خشکسالی را با استفاده از داده‌های تاریخی بارندگی سالیانه در آمریکا مقایسه کرده و شاخص SPI را به‌عنوان یک شاخص بالارزش برای برآورد شدت خشکسالی معرفی کردند. تحقیقات مختلفی نیز در خصوص مقایسه و کاربرد شاخص‌های مختلف خشکسالی در کشور ایران انجام شده است. تحقیقات خلیقی و همکارانش [۱۲] در استان مازندران نشان داد شاخص SPI را می‌توان به دلیل داشتن قابلیت‌های بیشتر از جمله تفکیک دقیق‌تر طبقه‌ها در هر یک از پدیده‌های ترسالی و خشکسالی، دقت بیشتر در جداسازی دوره‌های مرطوب و خشک و حساسیت بیشتر به تغییرات بارش به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص برای پایش خشکسالی معرفی کرد. در پژوهشی دیگر انصافی مقدم [۱۳] به مقایسه کارایی شاخص‌های متداول اقلیمی شامل شاخص درصد نرمال، شاخص دهک، شاخص SPI و شاخص ZSI در حوضه دریاچه نمک پرداخت. نتایج پژوهش وی نشان داد شاخص SPI و شاخص دهک‌ها مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل وضعیت خشکسالی طی سال‌های یک دوره طولانی مدت به‌شمار می‌آیند. شکوهی و مروتی [۱۴] با مقایسه دو شاخص SPI و RDI در حوضه دریاچه ارومیه نشان دادند حوضه یادشده در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ خشکسالی متوسط تا شدیدی را تجربه کرده است و

1. Standardized Precipitation Index

شرايط نرمال پس از سال ۲۰۰۰ در حوضه حاکم بوده است. بررسی کارایی هشت نمایه خشکسالی توسط علیپور و همکارانش [۱۵] در سه استان مرکزی ایران با استفاده از داده‌های بارش ۳۰ ساله در ۲۰ ایستگاه هواشناسی نشان داد شاخص SPI انعطاف بیشتری در بررسی واکاوی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه در مقایسه با سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهد. طبق نتایج پژوهش آنان SPI در پایه زمانی شش و ۱۲ ماهه بهترین عملکرد را در بررسی خشکسالی ماهانه دارند و نمایه‌های DI، CZI، ZSI شبیه هم عمل می‌کنند و با نمایش نرمال خشکسالی در جایگاه دوم قرار می‌گیرند. در آخر نمایه‌های RAI، PNPI و SIAP شدت خشکسالی را مانند هم بیان می‌کنند و در جایگاه سوم قرار می‌گیرند. جهانگیر و همکارانش [۱۶] با استفاده از شاخص SPI و شبکه عصبی در بررسی وضعیت خشکسالی استان تهران و البرز نشان دادند زمان‌های خشک در بخش پیش‌بینی و مشاهداتی در همه دوره‌های زمانی مربوط به محاسبه SPI، بسیار به هم نزدیک‌اند. امیرعطایی و همکارانش [۱۷] در پژوهشی با مقایسه ذاتی هفت شاخص خشکسالی رایج در پایش خشکسالی در شمال غرب کشور به مزیت نسبی زیاد شاخص SPI در مقایسه با سایر شاخص‌ها پی بردند. منتصری و امیرعطایی [۱۸] با استفاده از داده‌های تاریخی ۵۰ ساله بارش ۱۲ ایستگاه واقع در نقاط مختلف کره زمین اقدام به تولید ۱۰۰۰ سری متوالی بارش مصنوعی کرده و روش‌های مختلف پایش خشکسالی را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش SPI دقیق‌ترین و واقع‌بینانه‌ترین شاخص برای تجزیه و تحلیل خشکسالی است.

تحلیل منطقه‌ای به علت نگاه جامع‌تر، برتری نسبت به تحلیل نقطه‌ای دارد این در حالی است که اطلاعات به‌دست‌آمده از شاخص‌های خشکسالی به‌صورت نقطه‌ای در محل ایستگاه‌ها هستند و برای پایش خشکسالی کفایت نمی‌کنند. در این میان روش‌های زمین‌آمار به‌منظور تحلیل مکانی متغیرهای هواشناسی با سابقه طولانی در مطالعات منابع آب، قابلیت‌های فراوانی دارند و استفاده از این روش‌ها در حال گسترش است [۱۹]. روش کریجینگ^۱، کوکریجینگ^۲، کریجینگ با روند خارجی^۳، عکس مجذور فاصله (IDW)^۴،

با توجه به اهمیت دو رودخانه زرينه‌رود و سيمينه‌رود در تأمين بخش بزرگی از آب مورد نیاز دریاچه ارومیه و تأثیرپذیری دریاچه ارومیه از تغییر شرایط اقلیمی حوضه‌های یادشده، وضعیت خشکسالی در حوضه‌های جنوبی این دریاچه با استفاده از نمایه بارش استاندارد شد و بر اساس داده‌های بارندگی درازمدت بررسی شده و تغییرات شاخص SPI بر تراز آن در چهار دهه گذشته ارزیابی شد. همچنین، به‌منظور تحلیل منطقه‌ای شاخص SPI، با مقایسه روش‌های زمین‌آمار کریجینگ، کوکریجینگ و IDW، مناسب‌ترین روش درونیابی برای دوره‌های ترسالی و خشکسالی انتخاب و شاخص خشکسالی برای منطقه پهنه‌بندی شد.

روش کار

موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مطالعه‌شده

دریاچه ارومیه شورترین دریاچه ایران و دومین دریاچه فوق‌اشباع از نمک در دنیاست که به‌علت اهمیت اکولوژیکی آن، به عنوان یک پارک ملی و همچنین ذخیره‌گاه بین‌المللی زیست‌کره شناخته شده است. آب این دریاچه توسط ۱۲ رودخانه تأمین می‌شود که دو رودخانه زرينه‌رود و سيمينه‌رود، بیش از ۵۰ درصد سهم ورودی به دریاچه را به خود اختصاص داده‌اند [۲۳]. محدوده مطالعاتی منتخب در این پژوهش حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود، واقع در بخش جنوبی حوضه دریاچه ارومیه است. مساحت حوضه زرينه‌رود حدود ۱۱۸۰۰ کیلومتر مربع است و طول آبراهه اصلی آن حدود ۳۰۰ کیلومتر و مقادیر یادشده برای رودخانه سيمينه‌رود به‌ترتیب ۳۷۷۵ کیلومتر مربع و ۱۷۵ کیلومتر است.

1. Kriging
2. Co-Kriging
3. Kriging with an External Drift
4. Inverse Distance Weighting

5. Radial Basis Functions
6. Thin Plate Smoothing Spline
7. weighting Moving Average

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

نخستین بار مکی و همکارانش [۲۶] شاخص SPI را برای پایش خشکسالی در ایالت کلردای آمریکا ارائه کردند. این شاخص با اختصاص ارزش عددی به هر حادثه بارندگی در مقیاس زمانی معین قادر است نواحی با آب و هوایی متمایز را مقایسه کرده و میزان خشکسالی و ترسالی برای هر مکان با داشتن داده‌های بارندگی را مشخص کند [۲۷]. محاسبه شاخص SPI مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب، به سری طولانی مدت داده‌های بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه (سه ماهه، شش ماهه و...) در هر ایستگاه است. بسیاری از پژوهشگران توزیع گاما را پیشنهاد دادند. تابع چگالی احتمال برای توزیع گاما با رابطه ۱ نشان داده می‌شود [۲۸].

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{for } x > 0 \quad (1)$$

X: مقدار متغیر هواشناسی

β و α : پارامتر شکل و مقیاس توزیع گاما

$\Gamma(\alpha)$: تابع گاما است که رابطه آن به صورت رابطه ۲

است:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} \beta^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

به منظور برازش داده‌های مد نظر به توزیع گاما، لازم است ضرایب α و β برای کلیه سری‌های زمانی داده‌های بارش هر ایستگاه به طور جداگانه محاسبه شود. ادوارد و مکی [۲۹] روش حداکثر درست نمایی را برای برآورد ضرایب یاد شده پیشنهاد کردند که به صورت معادلات ۳ و ۴ تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad (4)$$

در معادله ۳ مقدار A از رابطه ۵ قابل محاسبه است.

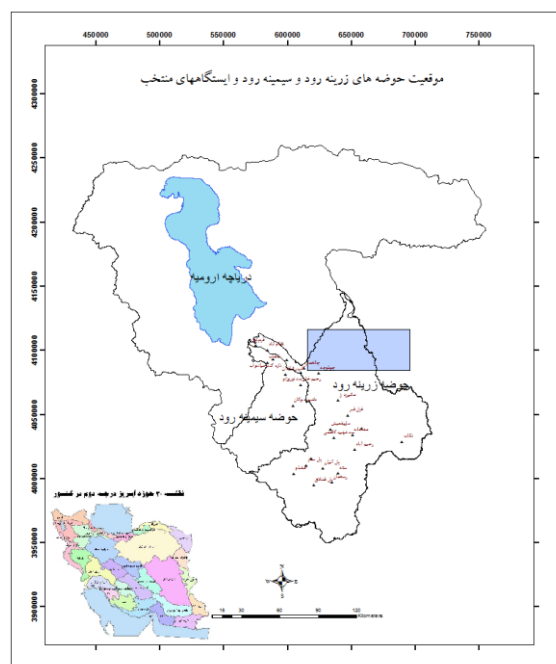
$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

n: تعداد مشاهدات بارش

\bar{X} : میانگین داده‌های بارش در بازه زمانی مد نظر

(ماهانه، سه ماهه و...) است.

موقعیت حوضه‌های یاد شده در حوضه دریاچه ارومیه و ایران در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مطالعه شده

در این مطالعه از سری زمانی بارندگی ماهیانه و سالیانه ۳۱ ایستگاه باران سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو استفاده شد. به منظور بررسی خشکسالی، داده‌های تاریخی بارندگی (حداقل ۳۰ سال) مورد نیاز است [۹]. به این منظور، دوره آماری ۴۳ ساله (سال‌های آبی ۱۳۵۰-۱۳۵۱ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۳) انتخاب و داده‌های ناقص در سری‌های ماهانه با استفاده از روش همبستگی و توسط نرم‌افزار SPSS، با استفاده از آمار ایستگاه مجاور با همبستگی زیاد تکمیل شدند. با توجه میانگین ۴۶ ساله بارندگی در ایستگاه‌های مطالعه شده، بارش متوسط منطقه‌ای بین ۱۹۲ تا ۶۰۲ میلی‌متر متغیر است و اقلیم نیمه‌خشک تا خشک را پوشش می‌دهد. قبل از تحلیل خشکسالی، همگنی داده‌ها با استفاده از روش جرم مضاعف بررسی شد [۲۴]. نتایج نشان داد داده‌ها با ضرایب همبستگی معناداری همگن اند. همچنین، ایستگاهی داده‌های بارندگی در همه ایستگاه‌ها با استفاده از روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و تصادفی بودن آنها با آزمون ران تست [۲۵] تأیید شد. نتایج سه آزمون به علت محدودیت صفحات مقاله ارائه نشده است.

جدول ۱. طبقه‌های مختلف خشکسالی در شاخص SPI

طبقات خشکسالی	مقدار SPI	حالت
ترسالی شدید ^۱ (EW)	۲ یا بیشتر	۱
ترسالی متوسط ^۲ (SW)	۱/۵۰ تا ۱/۹۹	۲
ترسالی ضعیف ^۳ (MW)	۱/۰۰ تا ۱/۴۹	۳
نرمال ^۴ (N)	۰/۹۹ تا -۰/۹۹	۴
خشکسالی ضعیف ^۵ (MD)	-۱/۴۹ تا -۱/۰۰	۵
خشکسالی متوسط ^۶ (SD)	-۱/۹۹ تا -۱/۵۰	۶
خشکسالی شدید ^۷ (ED)	-۲ یا کمتر	۷

مبانی تحلیل مکانی

به‌منظور تحلیل مکانی اطلاعات به‌دست‌آمده از شاخص بارش استاندارد شده، که به‌صورت نقطه‌ای برای ایستگاه‌های برآورد شد، از روش‌های زمین‌آماري کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) برای پهنه‌بندی خشکسالی در حوضه‌های زرينه‌رود و سیمینه‌رود در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. در روش‌های زمین‌آمار، داده‌های استفاده‌شده باید دو ویژگی داشته باشند: یکی توزیع نرمال داده‌ها است و دیگری اینکه میانگین و واریانس در مکان تغییر زیادی نداشته باشد. همچنان که قبلاً نیز اشاره شد، با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ برای انتقال داده‌ها از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد استفاده شد. آزمون همسان‌گردی نیز برای داده‌ها، با رسم واریوگرام‌های مختلف در جهت‌های گوناگون انجام گرفت. یکسان‌بودن واریوگرام‌ها در جهات مختلف، نشان‌دهنده همسان‌گرد بودن توزیع داده در منطقه مطالعاتی بود. از این راه شرایط استفاده از روش‌های زمین‌آماري برای داده‌ها بررسی و تأیید شد. در این روش‌ها ارتباط و همبستگی بین نمونه‌ها به‌صورت یک مدل ریاضی تعریف شده و امکان پیش‌بینی رفتار متغیر در نقاط مجهول فراهم می‌شود. بدیهی است این نوع روش‌ها برای متغیرهایی کاربرد دارند که بتوان برای آنها، همبستگی مکانی تعریف کرد. ابزارهای مختلفی برای بررسی این همبستگی وجود دارد که می‌توان به‌طور نمونه به تغییرنما^۸ اشاره کرد [۳۱]. نمودار

پس از محاسبه α و β ، احتمال تجمعی داده‌ها در مقیاس زمانی مد نظر را برای هر ایستگاه محاسبه کرد که با استفاده از رابطه ۶ به‌دست می‌آید.

$$G(x) = \int_0^x g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (6)$$

با فرض $t = x / \beta$ احتمال تجمعی به شکل تابع گامای ناقص درمی‌آید (رابطه ۷):

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\frac{x}{\beta}} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

از آنجا که تابع گاما برای مقادیر صفر قابل تعریف نیست و داده‌های بارش همواره دربرگیرنده تعداد زیادی مشاهده با مقدار صفر هستند، احتمال تجمعی داده‌های بارش به شکل رابطه ۸ قابل تعریف است:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (8)$$

q: احتمال ارزش داده صفر است.

حال لازم است $H(x)$ به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک انتقال داده شود که بر اساس آن شاخص SPI قابل محاسبه خواهد بود. برای انتقال داده‌ها از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد از روابط ۹-۱۲ استفاده شده است [۲۹].

$$Z = SPI = - \left(t \frac{c_1 + c_2 t + c_3 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0 < H(x) < 0.5 \quad (9)$$

$$Z = SPI = + \left(t \frac{c_1 + c_2 t + c_3 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0.5 < H(x) < 1 \quad (10)$$

همچنین:

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H(x)^2} \right]} \text{ for } 0 < H(x) < 0.5 \quad (11)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \text{ for } 0.5 < H(x) < 1 \quad (12)$$

$c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ ضرایب ثابت به ترتیب برابر $2/515517, 0.189269, 0.10328, 0.802853, 1/432788, 0.00130$ هستند.

طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی شاخص SPI بر اساس طبقه‌بندی ادوارد و مک کی [۲۹] در جدول ۱ آورده شده است. 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 مقدار آن مثبت شود [۲۷ و ۳۰].

1. Extremely Wet
2. Sever Wet
3. Moderately Wet
4. Normal
5. Moderately Drought
6. Severe Drought
7. Extremely Drought
8. Variogram

این روش‌ها از مدل برازش داده‌شده بر تغییرنا استفاده می‌شود. داده‌ها در روش کریجینگ از توزیع نرمال پیروی می‌کنند [۳۱ و ۳۲].

در این تحقیق از روش ارزیابی متقابل^۵ برای انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توزیع خشکسالی استفاده شد. در این روش یک نقطه به‌طور موقتی حذف شده و با اعمال روش مد نظر برای آن نقطه، مقداری برآورد می‌شود. سپس، مقدار حذف‌شده به جای خود برگردانده و این برآورد برای سایر نقاط به گونه‌ای مجزا صورت می‌گیرد. این کار برای هر یک از نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود به‌گونه‌ای که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای نقاط برآورد وجود خواهد داشت. به‌منظور ارزیابی و دقت روش‌های مختلف، از معیار خطاگیری ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2} \quad (15)$$

یافته‌ها

تعیین دوره خشکسالی و ترسالی

به‌منظور تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی در حوضه‌های سیمینه‌رود و زرینه‌رود، شاخص SPI براساس آمار سالانه بارش کلیه ایستگاه‌ها محاسبه شد. سپس، با رسم پلیگون تیسن [۳۳] در محیط GIS، مساحت مؤثر برای هر ایستگاه مشخص و توزیع بارش منطقه‌ای ۴۳ ساله برآورد شد و شاخص SPI برای کل دوره محاسبه شد. از این راه تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص بارش استانداردشده طی دوره آماری فراهم شد. در شکل ۲ تغییرات زمانی شاخص SPI منطقه‌ای برای دوره ۱۳۵۰-۱۳۹۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه طی چهار دهه اخیر شاهد دوره‌های متناوب خشک و تر بوده است و در سال‌های آبی ۱۳۵۹-۱۳۶۲ و ۱۳۶۲-۱۳۷۰-۱۳۷۴ به ترتیب با شدت ترسالی ۱/۳ و ۱/۶، دوره‌های ترسالی ضعیف و متوسط را به فاصله یک دهه تجربه کرده است. بررسی مقادیر سالانه SPI نشان داد ترسالی متوسط در دوره یادشده طی سال‌های آبی ۱۳۶۱-۱۳۶۲ و ۱۳۶۲-۱۳۷۳ و ۱۳۷۴-۱۳۷۴ به ترتیب با مقادیر SPI معادل ۱/۸۲ و ۱/۷۲ رخ داده است. پس از طی دو دوره متوالی ترسالی و به فاصله سه سال از

تغییرنا بر اساس زوج نقاطی ترسیم می‌شود که در فاصله معینی از همدیگر قرار دارند و از روش معادله ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (13)$$

$\gamma(h)$: مقدار تغییرنا در فاصله

h : مسافت بین نقاط

n : تعداد جفت نقاط در فاصله h

$Z(x_i)$: مقدار متغیر در نقطه x_i

$Z(x_i + h)$: مقدار متغیر در نقطه $x_i + h$ است.

با رسم نمودار تغییرنا می‌توان سه پارامتر اثر قطعه‌ای^۱، دامنه^۲ و آستانه^۳ را استخراج کرد.

پارامتر آستانه، که بیشترین تغییرنا را به خود اختصاص می‌دهد، در واقع همان واریانس مکانی متغیر بررسی شده است. دامنه تأثیر بیان‌کننده شعاع همبستگی نقاط با یکدیگر است و در خارج این فاصله، رفتار نقاط تصادفی خواهد بود. پارامتر اثر قطعه‌ای واریانس خطای نمونه‌ها را نشان می‌دهد [۳۲]. در این تحقیق با توجه به وجود ناهمسان‌گردی از تغییرنمای همه‌جانبه^۴، که بیان‌کننده متوسط تغییرات متغیر در همه راستاهاست، برای تشریح پیوستگی مکانی استفاده شد. در کلیه روش‌های مختلف زمین‌آمار از رابطه عمومی ۱۴ برای پیش‌بینی مقدار متغیر در یک نقطه مجهول استفاده می‌شود:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (14)$$

$Z^*(x_i)$: مقدار برآوردشده متغیر توسط مدل زمین‌آمار

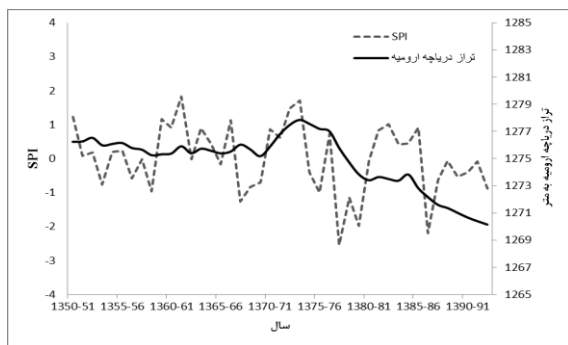
در نقطه x_i

$Z(x_i)$: مقدار مشاهداتی

λ_i : مقدار وزن‌های نقاط مشاهده‌شده است. اختلاف میان روش‌ها در محاسبه فاکتور وزنی λ است که به نقاط اطراف نقطه مد نظر داده می‌شود. کریجینگ تخمین‌گری نارایب، با کمترین مقدار واریانس تخمین است. کوکریجینگ همان روش کریجینگ است که از یک متغیر کمکی برای تخمین استفاده می‌کند که در این پژوهش از نقاط ارتفاعی استفاده شده است. برای محاسبه اوزان در

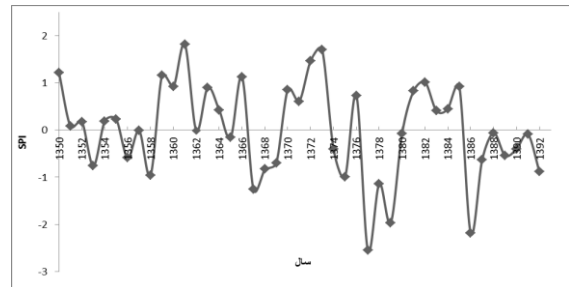
1. Nuuget
2. Range
3. Sill
4. Omnidirectional variogram

ایجاد شرایط نرمال یا ترسالی، دست‌خوش آثار سوء نوسانات و کاهش نزولات جوی نشده و از نظر منابع آب در شرایط نسبتاً پایداری قرار گرفته است. این در حالی است که پس از بروز سه سال خشکسالی متوالی ۱۳۷۷-۱۳۸۰، در تغییرات تراز دریاچه ارومیه با شاخص SPI روند متناسبی مشاهده نمی‌شود و به‌رغم افزایش مجدد بارش‌ها و بهبود نسبی شاخص SPI پس از سال‌های یادشده، دریاچه ارومیه قادر به بازگشت به شرایط پایداری گذشته نشد. به بیانی دیگر، با توجه به طولانی‌شدن خشکسالی در این حوضه، شرایط حوضه از مرحله خشکسالی هواشناسی عبور کرده و به مرحله خشکسالی کشاورزی و پس از آن هیدرولوژیکی رسیده است. البته، با توجه به اینکه پس از آخرین دوره خشکسالی، با افزایش بارش‌ها، شاخص SPI نیز رشد داشته است، نمی‌توان تداوم کاهش تراز آب دریاچه ارومیه را صرفاً به دلیل بروز دوره خشکسالی در حوضه دانست و به نظر می‌رسد عوامل انسانی در بهره‌برداری بیش از توان حوضه در این رابطه تأثیر داشته باشد. نتایج تحقیقات حسن‌زاده و همکارانش [۳۴] نشان داد ۶۲ درصد کاهش سطح دریاچه ارومیه به‌علت تغییر میزان ورودی دریاچه بر اثر تغییر اقلیم و انحراف آب برای مصارف بالادست، ۲۲ درصد این کاهش به علت احداث سد و ۳۲ درصد باقی‌مانده ناشی از کاهش بارش بر خود دریاچه بوده است. شکوهی و مروتی [۱۴] تغییر کشت دیم به آبی و افزایش سطح کشت آبی از ۱۵۰ هزار هکتار در سال ۱۳۵۸ به بیش از ۴۰۰ هزار هکتار در سال ۱۳۸۵ که افزایش ۲۶۶ درصدی آن هم‌زمان با دوره سه‌ساله خشکسالی بوده است، افزایش چاه‌های عمیق و رشد صنعت شیلات را به عنوان کارکرد مؤثر عوامل انسانی در خشک‌شدن تدریجی دریاچه ارومیه دانسته‌اند.

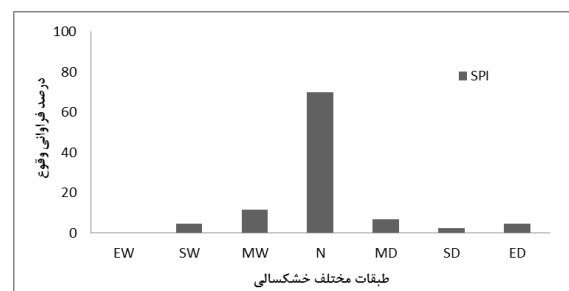


شکل ۴. مقایسه تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه با شاخص SPI

آخرین دوره ترسالی، یک دوره سه‌ساله خشکسالی طی سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۸۰ با متوسط شدت ۱/۸۹- در منطقه روی داده است. شدیدترین خشکسالی طی دوره آماری مربوط به سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ با شدت ۲/۵۵- به ثبت رسیده است که هم‌زمان با آغاز نخستین دوره خشکسالی در منطقه است که طبق توضیحات یادشده به مدت سه سال ادامه یافته است که با تحقیقات شکوهی و مروتی [۱۴] همسوست.



شکل ۲. شاخص سالانه بارش استانداردشده برای کل منطقه طی سال‌های آماری



شکل ۳. مقایسه درصد فراوانی طبقات خشکسالی شاخص SPI

برای بررسی بیشتر موضوع، فراوانی وقوع هر یک از هفت طبقه خشکسالی در شکل ۳ آورده شده است. حدود ۷۰ درصد از سال‌های بررسی شده منطقه مطالعه‌شده در وضعیت نرمال واقع شده است. شرایط خشکسالی و ترسالی (در درجات مختلف) نیز به ترتیب ۱۶ و ۱۴ درصد بوده است.

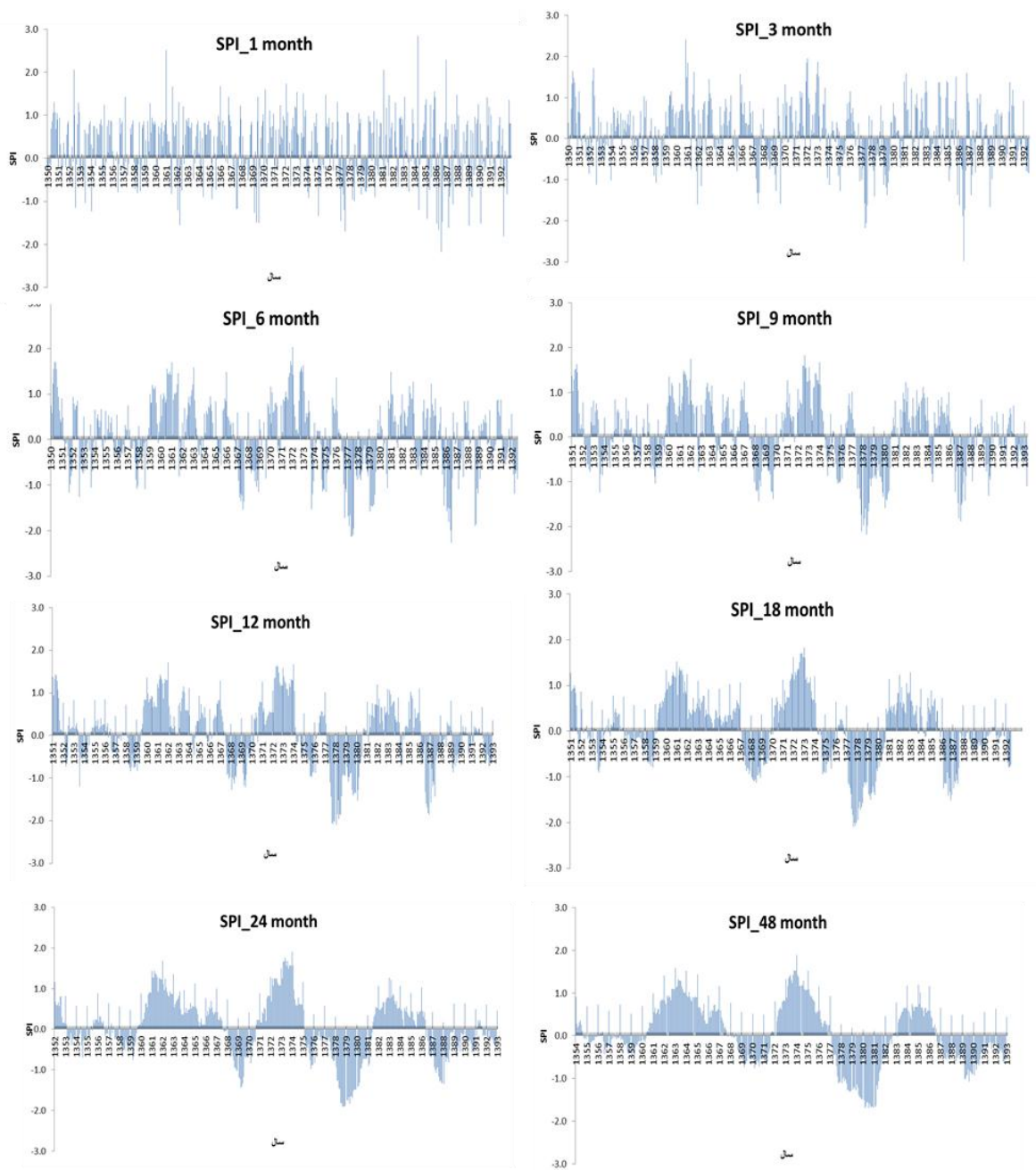
با توجه به تأمین بیش از ۵۰ درصد آب ورودی دریاچه ارومیه از رودخانه‌های سیمینه‌رود و زرینه‌رود، به نظر می‌رسد شاخص SPI قادر به توجیه بخشی از تغییرات تراز آبی دریاچه ارومیه باشد. به این منظور در شکل ۴ تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه و شاخص SPI آورده شده است. بررسی نمودار یادشده نشان می‌دهد تا سال ۱۳۸۰ روند تغییرات تراز آب دریاچه با تغییرات SPI همسوست. به بیانی، دریاچه ارومیه به‌رغم تجربه خشکسالی در برخی سال‌ها، با دریافت بارش‌های مناسب در سال‌های بعدی و

۲/۵۸ مربوط به سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۶۱ است. در مقیاس زمانی شش‌ماهه با توجه به تأثیر ماه‌های قبل در وضعیت خشکسالی و ترسالی هر ماه، از شدت پدیده‌ها کاسته و بر دامنه آنها افزوده شده است. به‌طوری که وضعیت ترسالی شدید به ناحیه ترسالی متوسط کوچ کرده است. در این مقیاس زمانی خشکسالی متوسط از سال ۱۳۶۸ آغاز و در سال ۱۳۸۹ به پایان رسیده است و شدیدترین حالت آن در سال ۱۳۸۷ با شدت ۲/۲۷- بوده است. در مقیاس زمانی نُه‌ماهه اولین پدیده خشکسالی در طبقه متوسط از دی‌ماه ۱۳۵۳ آغاز و پس از گذشت ۱۵ سال شرایط نرمال یا ترسالی دوباره از سال ۱۳۶۸ با تداوم چهارساله ادامه یافته است. سپس، با وقفه ۱۰ ساله وضعیت خشکسالی ضعیف بر منطقه مستولی شده است. با افزایش شدت خشکسالی، خشکسالی متوسط در اواخر دوره آبی ۱۳۶۸-۱۳۶۹ بر حوضه حاکم شده است. شدیدترین خشکسالی در این پایه زمانی در سال ۱۳۷۷ با شدت ۱/۸۳- روی داده است. بررسی نمودار روند تغییرات ۱۲ ماهه شاخص SPI نشان می‌دهد وضعیت خشکسالی و ترسالی در دوره آماری ۴۳ ساله در حد ترسالی متوسط تا خشکسالی متوسط قرار داشته و شرایط حاد وجود نداشته است. در این شرایط نخستین خشکسالی ضعیف در سال ۱۳۵۴ و خشکسالی‌های ضعیف تا متوسط پس از سال ۱۳۶۸ روی داده است. در مقیاس زمانی ۱۸ ماهه، خشکسالی متوسط در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۸، ۱۳۸۰، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ تجربه شده است.

همچنین، خشکسالی متوسط در سال‌های ۱۳۷۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ روی داده است. دوره‌های ترسالی ضعیف تا متوسط نیز در سال‌های ۱۳۵۱، ۱۳۵۲، ۱۳۶۱، ۱۳۶۲، ۱۳۶۳، ۱۳۶۷، ۱۳۷۲، ۱۳۷۱، ۱۳۷۳، ۱۳۷۴، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ رخ داده است. با بررسی مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه شاخص SPI به‌وضوح می‌توان وضعیت منطقه مطالعه‌شده را در هفت گروه طبقه‌بندی کرد. به‌طوری که حوضه‌های زیرین‌رود و سیمینه‌رود قبل از سال ۱۳۶۰ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۶۱-۱۳۶۷ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۶۸-۱۳۷۱ نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۷۲-۱۳۷۷ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۷۸-۱۳۸۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۸۴-۱۳۸۶ نرمال با گرایش به ترسالی ضعیف و ۱۳۸۷-۱۳۹۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف را تجربه کرده‌اند.

مقیاس‌های مختلف زمانی با در نظر گرفتن وضعیت بارش ماه‌های قبل از هر ماه و تأثیرگذاری بر ماه مد نظر، بررسی شدت و تداوم انواع خشکسالی‌ها را از دیدگاه‌های مختلف ممکن می‌سازد. بنابراین، با اعمال مقیاس‌های زمانی مختلف روی هر ماه، تأثیرات ماه‌های قبل از آن ماه نیز نشان داده می‌شود. به‌طوری که مقیاس زمانی سه‌ماهه، تأثیرات دو ماه قبل از هر ماه، و مقیاس زمانی شش‌ماهه آثار پنج ماه قبل از هر ماه و سایر مقیاس‌های ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه نیز به‌ترتیب یادشده آثار ماه‌های قبل را به تناسب مقیاس منتخب در ماه مد نظر لحاظ می‌کند. به همین علت مقیاس‌های زمانی مختلف می‌توانند روند خشکسالی، ترسالی، سال‌های نرمال، شدت وقوع و تأثیرات بر منابع آب را نشان دهند. در شکل ۵ تغییرات منطقه‌ای شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف زمانی با استفاده از آمار کلیه ایستگاه‌ها نشان داده شده است. بررسی نمودار روند تغییرات یک‌ماهه شاخص SPI نشان می‌دهد حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه در بیشتر ماه‌های سال طی دوره ۴۳ ساله گذشته در شرایط نرمالی واقع شده است. در مقیاس زمانی یک‌ماهه، نخستین خشکسالی ضعیف با شدت ۱/۱- در اردیبهشت ۱۳۵۳ ظهور یافته است. همچنین، خشکسالی ضعیف در مقیاس ماهانه در سال‌های ۱۳۵۴، ۱۳۶۳، ۱۳۶۹، ۱۳۶۸ (دو ماه)، ۱۳۷۰، ۱۳۷۸، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ روی داده است. نخستین خشکسالی متوسط در مقیاس ماهانه طی دوره آماری در سال ۱۳۷۸ با شدت ۱/۷- بوده است. همچنین، سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ نیز ماه‌های خشکسالی متوسط دارند. به این ترتیب، در سال‌های اخیر شاهد افزایش شدت خشکسالی از ضعیف به متوسط و همچنین کاهش زمانی وقوع ماهانه آن هستیم. در مقیاس ماهانه حوضه منتخب در سال‌های ۱۳۵۲، ۱۳۶۱، ۱۳۸۱، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۷ ترسالی شدیدی را تجربه کرده است که بیشترین شدت آن ۲/۸۳ در سال ۱۳۸۴ روی داده است. فاصله زمانی دومین و سومین ترسالی ماهانه حدود دو دهه است. این در حالی است که طی دوره یادشده حداقل پنج مورد خشکسالی ماهانه نیز رخ داده است. در چنین شرایطی نبود مدیریت مدبرانه منابع آب به ماندگاری و شدت آثار سوء خشکسالی منجر می‌شود.

نمودار روند تغییرات سه‌ماهه شاخص SPI که از دی‌ماه دوره آماری ۱۳۵۰-۱۳۵۱ آغاز می‌شود. ظهور نخستین پدیده خشکسالی شدید در تیرماه ۱۳۵۳ است. بزرگ‌ترین خشکسالی و ترسالی در این مقیاس به‌ترتیب برابر ۲/۹۸- و



شکل ۵. شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف زمانی

پهنه‌بندی سال‌های تر و خشک

ابتدا شاخص SPI از نظر قابلیت در نظر گرفتن به عنوان متغیر مکانی بررسی شد. بررسی منحنی تغییرنا برای کلیه سال‌های در نظر گرفته شده در محیط ARCMAP و الحاقیه Geostatistical Analyst نشان داد پیوستگی مکانی در نتایج شاخص SPI حفظ شده است به طوری که با افزایش فاصله، واریانس افزایش نشان می‌دهد. بنابراین، استاندارد شدن بارندگی طی فرایند محاسبه شاخص‌ها،

متغیر مکانی بودن آن را تحت شعاع قرار نداد و بر این اساس می‌توان از روش‌های زمین‌آماری برای تحلیل مکانی آنها بهره جست. در ادامه، مدل تئوریک مناسب برای تغییرناهای شاخص‌ها از میان مدل‌های خطی، گوسی، نمایی، دایره‌ای و کروی با استفاده از تکنیک ارزیابی متقابل بر اساس معیار RMSE انتخاب شد. در جدول ۲ مدل منتخب برای تغییرنا و پارامترهای تغییرنا برای شاخص SPI در سال‌های واقع شده در دوره‌های ترسالی و

داده‌هاست. مقدار سمی‌واریوگرام در مبدأ مختصات را اثر قطعه‌ای می‌نامند که در حالت آرمانی مقدار آن باید صفر باشد، اما در بیشتر مواقع بزرگ‌تر از آن است. در این حالت بخش تصادفی و یا ناساختار متغیر ظاهر می‌شود. در یک سمی‌واریوگرام از اثر قطعه‌ای نسبی، که مشخصه تصادفی بودن متغیر بررسی شده است، می‌توان برای ارزیابی ساختار مکانی داده‌ها استفاده کرد [۳۵]. وقتی این نسبت کمتر از ۰/۵ باشد، متغیر مد نظر ساختار مکانی قوی دارد و بیشتر شدن این پارامتر نشان می‌دهد تأثیر جز تصادفی متغیر بیش از جز ساختاری آن است و تخمین آن با روش‌های زمین‌آماري به‌صورت محدودتری امکان‌پذیر است [۳۲]. برای شاخص SPI در سال‌های بررسی شده این پارامتر کمتر از ۰/۵ است.

خشکسالی آورده شده است. در تفسیر پارامترها به فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی رسیده و به حالت افقی نزدیک می‌شود، دامنه یا شعاع تأثیر گفته می‌شود. این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای برآورد مقدار متغیر مجهول استفاده کرد. بدیهی است دامنه تأثیر بزرگ‌تر دلالت بر پیوستگی مکانی گسترده‌تری دارد. به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر خود به آن می‌رسد، آستانه گفته می‌شود. مقدار آستانه برابر با واریانس کل نمونه‌هایی است که در محاسبه سمی‌واریوگرام به‌کار رفته‌اند. در صورتی که در واریوگرام به‌دست آمده، در محدوده فاصله‌های مد نظر، تمایل به نزدیک شدن به حدی ثابت را ندارند، نشان‌دهنده وجود روند و یا عدم ایستایی در

جدول ۲. پارامترهای مدل‌های تغییرنا برای شاخص SPI در سال‌های مربوط به دوره‌های خشکسالی و ترسالی

دوره	SPI	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه (km)	اثر قطعه‌ای نسبی
ترسالی	۱۳۵۹-۱۳۶۰	دایره‌ای	۰/۰۱	۱/۴۰	۳۲/۲۱	۰/۰۱
	۱۳۶۰-۱۳۶۱	دایره‌ای	۰/۱۲	۰/۳۵۲	۸۵/۹۱	۰/۳۴
	۱۳۶۱-۱۳۶۲	خطی	۱/۵۹۸	-	-	-
	۱۳۷۰-۱۳۷۱	گوسی	۰/۱۳۴	۰/۳۴۶	۶۸/۴۵	۰/۳۸
	۱۳۷۱-۱۳۷۲	کروی	۰/۱۰۹	۰/۲۵۹	۱۶۸/۷۷	۰/۴۲
	۱۳۷۲-۱۳۷۳	خطی	۰/۳۰۲	-	-	-
	۱۳۷۳-۱۳۷۴	نمایی	۰/۱۱۸	۰/۵۵۶	۲۳/۸۸	۰/۲۱
خشکسالی	۱۳۷۷-۱۳۷۸	گوسی	۰/۱۳۱	۰/۳۲۱	۲۲/۷۸	۰/۴۱
	۱۳۷۸-۱۳۷۹	گوسی	۰/۱۰۷	۰/۶۹	۱۶/۸۸	۰/۱۵
	۱۳۷۹-۱۳۸۰	نمایی	۰/۱۵۱	۰/۴۴۵	۱۶/۸۸	۰/۳۴

براساس نقشه‌های پهنه‌بندی، درصد طبقات مختلف شاخص SPI به تفکیک حوضه‌های مطالعه‌شده در جدول ۴ آورده شد.

اثرپذیری حوضه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود از وقایع ترسالی و خشکسالی طی چهار دهه گذشته یکسان نبود به طوری که در ترسالی ۱۳۵۹-۱۳۶۰، ۵۵ درصد حوضه سيمينه‌رود از ترسالی بهره‌مند شد و زرينه‌رود فقط ۲۵ درصد شامل پهنه ترسالی در طبقات مختلف شد. حوضه زرينه‌رود در ترسالی ۱۳۷۲-۱۳۷۳، ۲۸ درصد در طبقه ترسالی متوسط، ۶۸ درصد ترسالی ضعیف و ۵ درصد شرایط نرمال را تجربه کرده است. این در حالی است که در همان سال، سيمينه‌رود ۳۲ درصد ترسالی ضعیف و ۶۸ درصد را در شرایط نرمال به سر برده است. در سال‌های

در ادامه، به‌منظور امکان تحلیل مکانی داده‌ها، روش مناسب میان‌یابی بر اساس معیار RMSE انتخاب شد (جدول ۳). در روش کوکریجینگ از لایه ارتفاعی منطقه به عنوان متغیر کمکی استفاده شد. در بیشتر سال‌ها روش کوریجینگ برای پهنه‌بندی مناسب تشخیص داده شد. اختری و همکارانش [۳۶] نیز ضمن تأیید متغیر مکانی بودن شاخص SPI، نشان دادند روش کوریجینگ در مقایسه با روش‌های کوکریجینگ، میانگین متحرک وزن‌دار و ¹TPSS دقت بیشتری دارد. در نهایت، پهنه‌بندی شاخص بارش استاندارد شده در سال‌های مد نظر استخراج و در محیط GIS ترسیم شد. با توجه به محدودیت صفحات مقاله، نقشه پهنه‌بندی به‌طور نمونه فقط برای یک سال آورده شد (شکل ۶).

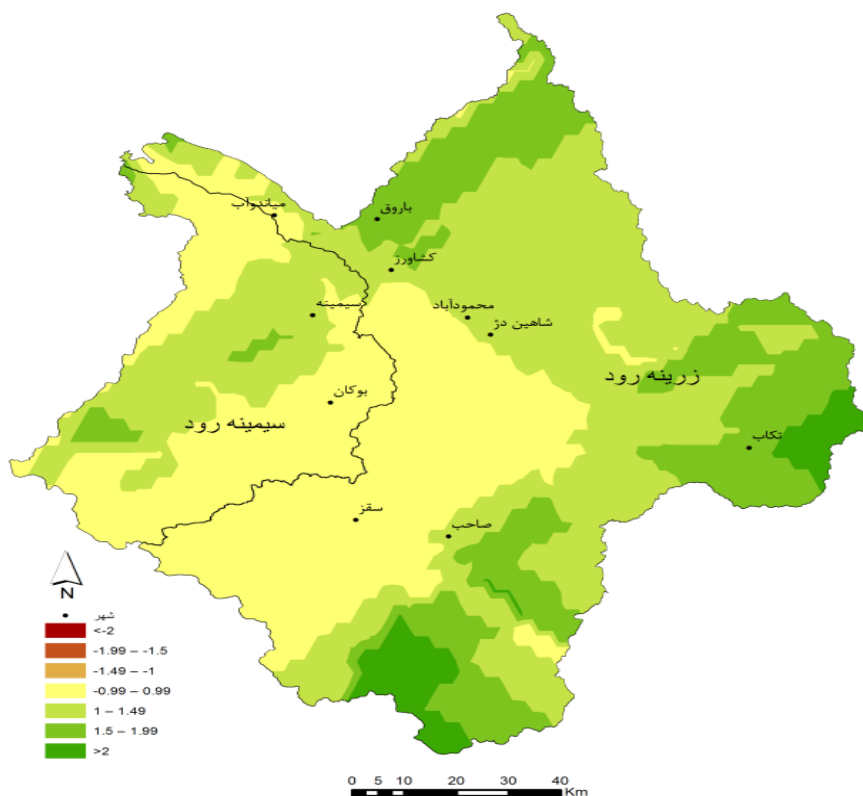
1. Thin Plate Smoothing Splines

و ۸۳ درصد پهنه حوضه زرينه‌رود در شرایط نرمال قرار گرفت. بنابراین، باید پذیرفت آسیب‌پذیری حوضه سیمینه‌رود از وقایع خشکسالی بیشتر از حوضه زرينه‌رود است که باید این موضوع در مدیریت منابع آب حوضه‌های یادشده مد نظر مسئولان قرار گیرد.

خشکسالی، آسیب‌پذیری حوضه سیمینه‌رود بیشتر از زرينه‌رود بود. در خشکسالی ۱۳۷۹-۱۳۸۰، ۴۶ درصد حوضه سیمینه‌رود درگیر خشکسالی شدید شد. در همین سال، خشکسالی شدید در حوضه زرينه‌رود در ۲۸ درصد از مساحت آن ظاهر شد. در خشکسالی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ نیز ۹۸ درصد حوضه سیمینه‌رود دچار خشکسالی ضعیف شد

جدول ۳. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی بر اساس RMSE

سال‌های واقع شده در دوره‌های ترسالی و خشکسالی										روش میان‌یابی	شاخص خشکسالی
۱۳۸۰-۱۳۷۹	۱۳۷۹-۱۳۷۸	۱۳۷۸-۱۳۷۷	۱۳۷۶-۱۳۷۵	۱۳۷۳-۱۳۷۲	۱۳۷۲-۱۳۷۱	۱۳۷۱-۱۳۷۰	۱۳۶۲-۱۳۶۱	۱۳۶۱-۱۳۶۰	۱۳۶۰-۱۳۵۹		
۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۵۱	۱/۲۵	۰/۹۰	۱/۰۷	کریجینگ	توزیع استاندارد
۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵۳	۱/۲۶	۰/۹۲	۱/۰۵	کوکریجینگ	
۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۶	۱/۲۷	۰/۹۵	۱/۰۳	عکس فاصله	



شکل ۶. پهنه‌بندی ترسالی در سال ۱۳۶۱-۱۳۶۲ براساس مدل کریجینگ

جدول ۴. درصد طبقات ترسالی و خشکسالی در حوضه‌های زربینه‌رود و سیمینه‌رود

دوره	سال	حوضه	ترسالی شدید	ترسالی متوسط	ترسالی ضعیف	شرایط نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید
ترسالی	۱۳۵۹-	زربینه‌رود	٪۱	٪۵	٪۱۹	٪۷۵	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۶۰	سیمینه‌رود	٪۷	٪۲۴	٪۲۴	٪۴۵	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۶۰-	زربینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۳	٪۹۷	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۶۱	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۱۲	٪۸۸	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۶۱-	زربینه‌رود	٪۶	٪۲۵	٪۳۸	٪۳۱	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۶۲	سیمینه‌رود	٪۰	٪۶	٪۳۴	٪۶۰	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۰-	زربینه‌رود	٪۰	٪۱	٪۴۷	٪۵۲	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۱	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۵	٪۹۵	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۱-	زربینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۸	٪۹۲	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۲	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۲۴	٪۷۶	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۲-	زربینه‌رود	٪۰	٪۲۸	٪۶۷	٪۵	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۳	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۳۲	٪۶۸	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۳-	زربینه‌رود	٪۱۰	٪۳۳	٪۲۴	٪۳۳	٪۰	٪۰	٪۰
	۱۳۷۴	سیمینه‌رود	٪۰	٪۳۹	٪۵۶	٪۵	٪۰	٪۰	٪۰
خشکسالی	۱۳۷۷-	زربینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۷۳	٪۲۷	٪۰
	۱۳۷۸	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۵۷	٪۴۳	٪۰
	۱۳۷۸-	زربینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۸۳	٪۱۷	٪۰	٪۰
	۱۳۷۹	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۳	٪۹۷	٪۰	٪۰
	۱۳۷۹-	زربینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۷۲	٪۲۸
	۱۳۸۰	سیمینه‌رود	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۵۴	٪۴۶

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه طی چهار دهه اخیر شاهد دوره‌های متناوب تر و خشک مهمی بوده است. در سال‌های آبی ۱۳۵۹-۱۳۶۲ و ۱۳۷۰-۱۳۷۴ به ترتیب با شدت ترسالی ۱/۳ و ۱/۶، دوره‌های ترسالی ضعیف را به فاصله یک دهه تجربه کرده است. ترسالی متوسط در دوره یادشده طی سال‌های آبی ۱۳۶۱-۱۳۶۲ و ۱۳۷۳-۱۳۷۴ به ترتیب SPI معادل ۱/۸۲ و ۱/۷۲ رخ داده است. پس از طی دو دوره متوالی ترسالی و به فاصله سه سال از آخرین دوره ترسالی، یک دوره سه‌ساله خشکسالی در سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۸۰ با متوسط شدت ۱/۸۹- در منطقه روی داده است. شدیدترین خشکسالی مربوط به سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ با شدت ۲/۵۵- به ثبت رسیده است.

بررسی فراوانی وقوع هر یک از هفت طبقه خشکسالی نشان داد منطقه مطالعه شده حدود ۷۰ درصد از سال‌های بررسی شده در وضعیت نرمال قرار داشته است و حاکمیت

شرایط خشکسالی فقط ۱۶ درصد بوده است. با توجه به تأمین بیش از ۵۰ درصد آب ورودی دریاچه ارومیه از رودخانه‌های سیمینه‌رود و زربینه‌رود، شاخص SPI با تغییرات تراز دریاچه ارومیه بررسی شد. تا سال ۱۳۸۰ روند تغییرات تراز آب دریاچه با تغییرات SPI همسو بود و دریاچه ارومیه به‌رغم تجربه خشکسالی در برخی سال‌ها، با دریافت بارش‌های مناسب در سال‌های بعدی و ایجاد شرایط نرمال یا ترسالی، دست‌خوش آثار سوء نوسانات و کاهش نزولات جوئی نشد، ولی پس از بروز خشکسالی متوالی سه‌ساله طی دوره ۱۳۷۷-۱۳۸۰، تغییرات تراز دریاچه ارومیه با شاخص SPI روند معکوسی داشت و با بهبود نسبی شاخص SPI پس از سال‌های یادشده، دریاچه ارومیه قادر به بازگشت به شرایط پایداری سابق نشد. به‌بیانی، با توجه به طولانی‌شدن خشکسالی در این حوضه، شرایط حوضه از مرحله خشکسالی هواشناسی عبور کرده و به مرحله خشکسالی کشاورزی و پس از آن هیدرولوژیکی

- [4]. Palmer WC. Meteorological Drought. U.S. Weather Bureau Technical paper. 1965; 45: 1-58.
- [5]. Wilhite DA, Glantz MH. Understanding the drought phenomenon, The role of definitions. *Water International*. 1985; 10: 111-120.
- [6]. Noohi K, Asgari A. Study of Drought and Return Period Drought in Qum Region. *Agricultural Aridity and Drought, Scientific and Extension Quarterly, Hahad Agriculture*. 2006; 15: 47-64.
- [7]. Barua S, Ng AWM, Perera BJC. Comparative Evaluation of Drought Indices: A Case Study on The Yarra River Catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2011; 137(2): 215-226.
- [8]. Moreira EE, Coelho CA, Paulo AA, Pereira LS, Mexia JT. SPI-based Drought Category Prediction Using Loglinear Models. *Journal of Hydrology*. 2008; 354: 116-130.
- [9]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales. In *Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology*. AMS: Boston, MA. 1995: 233-236.
- [10]. Hayes MJ. Drought Indices. National Drought Mitigation Center, NOAA, Press..2001; 11p.
- [11]. Keyantash J, Dracup JA. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83(8): 1167-1180.
- [12]. Khalighi Sigaroudi Sh, Sadeghi Sangdehi A, Awsati Kh, GHavidel Rahimi Y. The Study of Drought and Wet Year Assessment models for Stations in Mazandaran province. *Iranian Journal of Rangeland and Desert*. 2009; 16(1): 44-54. [Persian]
- [13]. Ensafimoghadam T. An Investigation and assessment of climatological indices and determination of suitable index for climatological droughts in the Salt Lake Basin of Iran. *Iranian Journal of Rangeland and Desert*. 2007; 14(2): 271-288. [Persian]
- [14]. Shokoohi A, Morovati R. An investigation on the Urmia Lake Basin drought using RDI and SPI indices. *Watershed Engineering and Management*. 2014; 6(3):232-246. [Persian]
- [15]. Alipour A, Hashemi M, Hosseini SA, Pazhooh F. Assessment and comparison of multiple index climatic droughts and determine the best Index in central Iran. *ECO Hydrology*. 2017; 4(1): 133-147. [Persian]

رسیده است. بنابراین، نمی‌توان تداوم کاهش تراز آب دریاچه ارومیه را صرفاً به دلیل بروز دوره خشکسالی در حوضه توجیه کرد و به نظر می‌رسد عوامل انسانی به دلیل بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب در این رابطه تأثیر داشته باشد.

با بررسی شاخص در مقیاس زمانی طولانی مدت، وضعیت منطقه مطالعه شده در هفت گروه شامل قبل از سال ۱۳۶۰ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۶۱-۱۳۶۷ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۶۸-۱۳۷۱ نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۷۲-۱۳۷۷ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۷۸-۱۳۸۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۸۴-۱۳۸۶ نرمال با گرایش به ترسالی ضعیف و ۱۳۸۷-۱۳۹۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف طبقه‌بندی شد.

استاندارد شدن بارندگی طی فرایند محاسبه شاخص SPI، متغیر مکانی بودن آن را تحت شعاع قرار نداد، بنابراین امکان استفاده از روش‌های زمین‌آماری برای تحلیل مکانی شاخص یادشده فراهم شد. از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و IDW برای پهنه‌بندی شاخص SPI در ده سال واقع شده در دوره‌های ترسالی و خشکسالی استفاده شد. در بیشتر سال‌ها، روش کریجینگ برای پهنه‌بندی مناسب تشخیص داده شد.

با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی، مساحت تحت تأثیر طبقات مختلف خشکسالی به تفکیک حوضه‌های زیرین رود و سیمینه‌رود استخراج شد. نتایج نشان داد تأثیرپذیری حوضه سیمینه‌رود از پدیده خشکسالی بیشتر از حوضه زیرین رود بود.

منابع

- [1]. Madani K, AghaKouchak A, Mirchi A. Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*. 2016; 49(6): 997-1016.
- [2]. Tabari H, Abghari H, Hosseinzadeh Talae P. Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrol. Process*. 2012; 26: 3351-3361.
- [3]. Zahedie Gharahaghaj M, GHavidel Rahimi Y. Determine of the threshold of drought and calculate the reliable precipitation in the Lake Urmia basin. *Physical Geography Research Quarterly*. 2007; 59:21-34. [Persian]

- [16]. Jahangir MH, Khoshmashraban M, Yousefi H. Drought monitoring with Standard Precipitation Index (SPI) and drought forecasting with Multi-layers perceptron (Case study: Tehran and Alborz Provinces). *Ecohydrology*. 2015; 2(4):417-428. [Persian]
- [17]. Amirataee B, Montaseri M, Yasi M. Comparison of Inherent Performance of Seven Drought Indices in Drought Mitigation Using a Monte Carlo Simulation Approach. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2015; 43(1): 25-39. [Persian]
- [18]. Montaseri M, Amirataee B. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. *Int. J. Climatol*. 2016; 31: 162-173.
- [19]. Wamwling A. Accuracy of geostatistical prediction of yearly precipitation in Lower Saxony. *Journal of Environmetrics*. 2003; 14(7): 699-709.
- [20]. Zheng X, Basher R. Thin-Plate Smoothing Spline Modeling of spatial climate data and its application to mapping South Pacific Rainfalls. *Journal of Monthly Weather Review*. 1995; 123: 3086-3102.
- [21]. Tabios GQ, Salas JD. A comparative analysis of technique for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*. 1985; 21(3): 365-380.
- [22]. Mozafari GA, Khosravi Y, Abbasi E, Tavakoli F. Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices. *World Applied Sciences Journal*. 2011; 15 (4): 474-482.
- [23]. Abbaspour M, Nazaridoust A. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*. 2007; 64(2): 161-169.
- [24]. Bars RL. *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*. Addison-Wesley Publishing Co., New York, USA; 1990
- [25]. Adeloye AJ, Montaseri M. Preliminary Stream flow Data Analyses Prior to Water Resources Planning Study. *Hydrological Sciences Journal*. 2002; 47(5): 679-692.
- [26]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. AMS: Boston, MA:1993; 179-184.
- [27]. Mishra AK, Singh VP, Desa VR. Drought Characterization: A Probabilistic Approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2009; 23(1): 41-55.
- [28]. Cacciamani C, Morgillo A, Marchesi S, Pavan V. *Monitoring, Forecasting Drought on a Regional Scale Emilia-Romagna Region*. Netherlands: Springer-Verlag. 2005; 62(1): 29-48.
- [29]. Edwards DC, McKee TB. *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Climatology Report number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado; 1997.
- [30]. Wu H, Svobod MD, Hayes MJ, Wilhite DA, Wen F. 2007. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*. 200; 1(27): 65-79.
- [31]. Issaks EH, Srivastava RM. *Applied geostatistics*. Newyork, Oxford University Press; 1989: 561 pp.
- [32]. Hassani Pak AA. *Geostatistics*. 2nd ed. Tehran university pub; 2010. [Persian]
- [33]. Thiessen AH. 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*. 1911; 39(7): 1082-1084.
- [34]. Hassanzadeh E, Zarghami M, Hassanzadeh Y. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*. 211; 26(1): 129-145.
- [35]. Litaor MI, Reichmann O, Belzer M, Auerswald K, Nishri A, Shenker M. Spatial Analysis of Phosphorus Sorption Capacity in a Semiarid Altered Wetland. *Journal of Environ. Qual*. 2003; 32: 335-343.
- [36]. Akhtari R, Mahdian MH, Morid S. Assessment of Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices in Tehran Province. *Iran_Water Resources Research*. 2006; 3:27-37. [Persian]