

بررسی روند تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از شاخص فازی بارندگی و تبخیر - تغرق استاندارد شده (SEPI)

حسین انصاری^۱ و محمد نادریان فر^{۲*}

(E-mail: Naderian.mohamad@yahoo.com)

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۱/۳۱ - تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۲۷)

چکیده

دشت نیشابور با اقلیم نیمه خشک یکی از دشتهایی استان خراسان رضوی است که با افزایش برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در سال‌های اخیر روبرو بوده است، لذا مدیریت تقاضا در این دشت از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، برای یافتن اثرات تجمعی بارندگی و تبخیر - تعرق بر روی نوسانات سطح آب زیرزمینی، از داده‌های بارندگی ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی در طول دوره ۸۵-۱۳۵۲ استفاده شد. در ابتدا با استفاده از روش هارگریوز و سامانی تبخیر - تعرق در ایستگاه‌های مورد مطالعه تخمین زده شد. سپس با استفاده از روش عکس فاصله، داده‌های نقطه‌ای به سطح تعمیم داده شده و مقدار متوسط بارندگی و تبخیر - تعرق گیاه مرجع در دشت برآورد گردید. نتایج آزمون ناپارامتری من - کندال نشان می‌دهد که شیب سطح آب زیرزمینی در دشت دارای روند منفی بود، درحالی‌که بارندگی فاقد روند می‌باشد. به همین دلیل، برای یافتن همبستگی بارندگی و تبخیر - تعرق تجمعی بر روی سطح آب زیرزمینی دشت، ابتدا روند از سطح آب زیرزمینی به روش برون‌یابی منحنی روند حذف گردید. برای بررسی اثر تجمعی بارندگی و تبخیر - تعرق از شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص فازی بارندگی و تبخیر - تعرق استاندارد شده استفاده شد. نتایج تحلیل‌ها به صورت سری زمانی متوالی نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب زیرزمینی با مقادیر شاخص فازی بارندگی و تبخیر - تعرق استاندارد شده از همبستگی بیشتری در مقیاس‌های مختلف زمانی نسبت به شاخص بارندگی استاندارد شده برخوردار است.

کلمات کلیدی: آزمون من - کندال، بارندگی، تبخیر - تعرق، تبخیر - تعرق استاندارد شده، سطح آب زیرزمینی، شاخص فازی بارندگی

۱ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد - ایران

۲ - دانشجوی دکتری تخصصی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد - ایران (نویسنده مسئول مکاتبات *)

مقدمه

برای آگاهی از وضعیت منابع آب زیرزمینی و مدیریت بهینه آن، لازم است بررسی دقیقی از نوسانات سطح آب زیرزمینی انجام شود. با بررسی دقیق نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌توان از آن در برنامه‌ریزی تأمین آب قابل اعتماد و نیز در مدیریت منابع آب استفاده نمود (۱). بدین منظور، یافتن اثرات بارندگی و بررسی تغییرات آن بر روی سطح آب زیرزمینی ضروری است (۱۱). آب رودها از منابع مهم تغذیه زیرزمینی هستند که با کاهش حجم آب و بارندگی یا خشک شدن بر اثر خشکسالی، این منبع تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه نیز کاهش می‌یابد یا به کلی قطع می‌شود. همچنین، بر اثر خشکسالی آب مخازن سدها کاهش می‌یابد، آب چشمه‌ها کم و یا کاملاً خشک می‌شود که اثر نامطلوبی بر سفره‌های آب زیرزمینی منطقه تحت تأثیر خود می‌گذارد. با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در نواحی خشک، علاوه بر پیشروی بیابان (ناپدید شدن گیاهان طبیعی) آب شور در چاه‌های آب شیرین پیشروی می‌کند و آبیاری زیاد با آب شور سرانجام به کویری شدن آن زمین خواهد انجامید (۵).

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است، رخ دهد. خشکسالی غالباً به عنوان یک پدیده خزننده توصیف می‌شود و توصیف زمانی و مکانی آن بسیار مشکل است (۴). همچنین به دلیل پیچیدگی زیاد این پدیده، فهم آن در مقایسه با دیگر بلاهای طبیعی مشکل‌تر بوده و بخش‌های بیشتری را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. هدف یک شاخص خشکسالی، تعیین ساده و کمی سه ویژگی شدت، تداوم و گستردگی مکانی آن است.

امروزه تحقیقات مختلفی روی آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام شده است تا شناختی اصولی‌تر و مدیریت منابع آب حاصل گردد. نتایج تحقیقی که برای شناختن و یافتن روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه Orissa هند و تأثیر خشکسالی و دخالت بشر با استفاده از روش‌های آماری ناپارامتری من - کندال انجام شد، نشان داد که افت سطح آب به علت کمبود باران در طول سال‌های خشک، دمای بالا و دخالت بشری توانسته در سال‌های مرطوب با تغذیه این افت را جبران کند (۱۶). تحقیق دیگری جهت

یافتن تأثیر خشکسالی بر آب زیرزمینی در شمال غربی منطقه بنگلادش انجام گرفت که نتایج تحلیل هیدروگراف سطح آب زیرزمینی و سری زمانی بارندگی نشان داد که افزایش برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری در فصل‌های خشک و بازگشت خشکسالی‌ها از عوامل افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه می‌باشد و اگر مداخله بشر در سیستم آب زیرزمینی وجود نمی‌داشت، یکی از عوامل خشکسالی آب زیرزمینی به طور عمده مربوط به کاهش بارندگی‌ها بود (۲۰). جهت بررسی واکنش هیدرولوژیکی خشکسالی‌های هواشناسی در یک حوزه بزرگ بسته در منطقه مرکزی اسپانیا، از شاخص استاندارد بارندگی^۱ (SPI) در مقیاس زمانی مختلف، استفاده شد. نتایج نشان داد که مقیاس زمانی بلندمدت (بیشتر از ۱۲ ماه) نمی‌تواند برای تعیین خشکسالی در این منطقه مفید باشد و به‌طورکلی، تغییرات جریان‌های سطحی با مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (SPI و منابع آب زیرزمینی پاسخ مقیاس زمانی بلندمدت (۷-۱۰ ماه) قابل تبیین می‌باشد (۲۲). همچنین از شاخص استاندارد شده بارش (SPI) برای بررسی اثر خشکسالی و بارندگی روی سطح آب زیرزمینی در سه منطقه تحت آبیاری در حوزه ماری - دارلین استرالیا استفاده شده است که نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین شاخص SPI و نوسانات سطح آب زیرزمینی در منطقه برقرار است و به وسیله آن می‌توان الگوی خشکسالی‌های اصلی در استرالیا را تعیین کرد (۱۱).

از جمله تحقیقاتی که در ایران انجام گرفته است، بررسی اثر بارندگی بر روی نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور می‌باشد که از شاخص SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شده است و نتایج نشان داد که SPI با مقیاس‌های زمانی بلندمدت (۴۲ ماهه) بیشترین تأثیر را روی نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد (۷). همچنین نتایج ارزیابی اثرات شدت - مدت خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی گوناگون روی نوسانات سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف دشت نیشابور نشان داد که SPI با مقیاس زمانی بلندمدت روی نوسانات سطح آب زیرزمینی تأثیر دارد و این مقیاس زمانی در نقاط مختلف دشت متفاوت است (۸).

مشهد پرداخته شد. در این تحقیق، شاخص SEPI را که علاوه بر بارندگی، درجه حرارت نیز در آن وارد شده است توسعه داده شد. بررسی نتایج حاصل از پایش خشکسالی با شاخص SEPI با SPI، همبستگی بیش از ۹۰ درصد را بین مقادیر این دو شاخص برای همه مقیاس‌های زمانی نشان داد (۲).

در این مطالعه، برای یافتن ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی و وقوع خشکسالی‌ها سعی به استفاده از شاخص‌های مناسب پایش خشکسالی بوده است و از آنجایی که علاوه بر بارندگی یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر شدت خشکسالی درجه حرارت و به تبع آن تبخیر - تعرق مرجع می‌باشد، لذا علاوه بر شاخص SPI، از شاخص اصلاح شده SEPI استفاده کرده و از آن به بررسی تأثیر متقابل بارندگی و تبخیر - تعرق تجمعی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور پرداخته می‌شود (۲).

مواد و روش‌ها

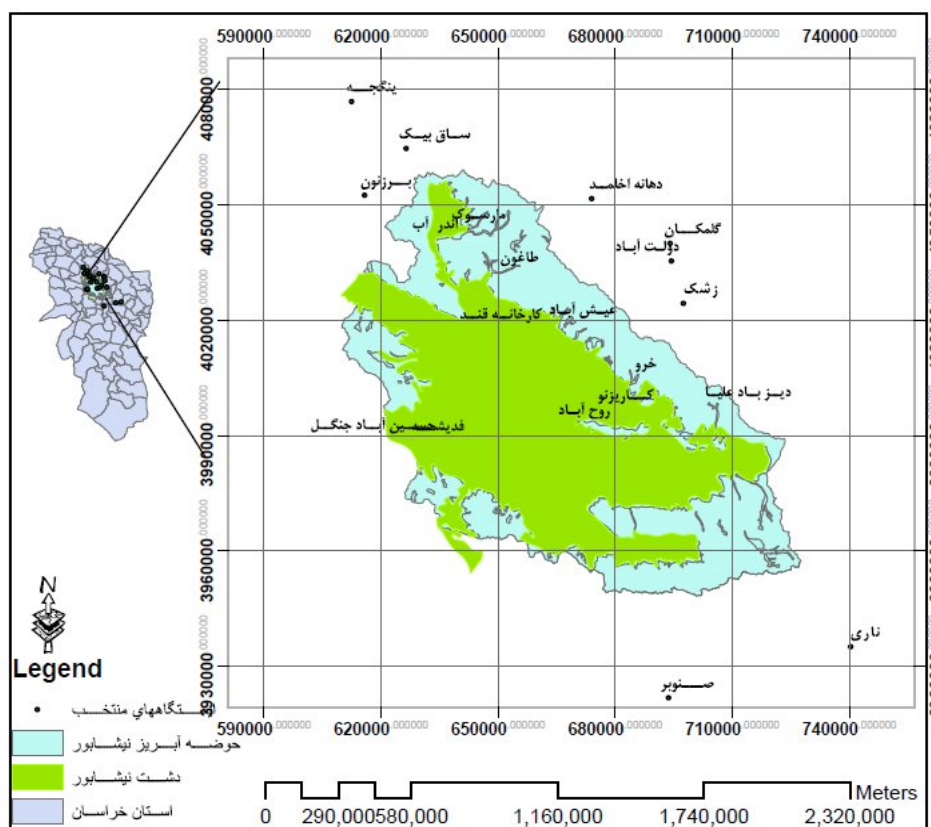
منطقه مورد مطالعه

دشت نیشابور جزئی از حوضه آبریز کالشور نیشابور می‌باشد که در دامنه جنوبی ارتفاعات بینالود و در شمال شرق کویر مرکزی واقع شده است و دارای اقلیم نیمه خشک می‌باشد. این حوضه در طول جغرافیایی $17^{\circ} 57'$ تا $30' 59^{\circ}$ شرقی و عرض جغرافیایی $40' 35^{\circ}$ تا $39' 36^{\circ}$ شمالی واقع شده و از شمال به خط‌الرأس ارتفاعات بینالود، از شرق به بلندی‌های لیلاجوق و یال پلنگ، از جنوب به تپه ماهوارهای نیزه‌بند، سیاه‌کوه و کوه نمک و از غرب به حوضه آبریز دشت سبزوار محدود شده است (شکل ۱) (۶). وسعت کل حوضه 7350 کیلومتر مربع است که 3160 کیلومتر مربع آن را ارتفاعات (۴۳ درصد) و 4190 کیلومتر مربع را دشت (۵۷ درصد) تشکیل می‌دهد. بلندترین نقطه منطقه در ارتفاعات بینالود واقع در شمال شرقی دشت بوده که از سطح دریا 3300 متر ارتفاع دارد، دشت در این محدوده (ارتفاعات بینالود) دارای بافت آبرفتی و تحت تأثیر تغذیه سطحی و زیرزمینی مناسبی قرار دارد، اما در نیمه جنوبی و غربی، دشت دارای بافت دانه‌ریز آبرفتی و وجود سازندهای دانه‌ریز مارنی و سایر رسوبات تبخیری می‌باشد که باعث شده، آبرفت از نظر دانه‌بندی وضعیت مطلوبی نداشته باشد. پایین‌ترین نقطه

بررسی کاربرد شاخص SPI روشن می‌سازد که اگرچه به جهت امکان پایش خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی - اجتماعی، ساده بودن محاسبات، نیاز به حداقل داده‌ها و محاسبه مقیاس‌های زمانی مختلف، می‌توان این شاخص را به عنوان شاخص نسبتاً مناسبی برای پایش شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار داد، اما از آنجایی که در این شاخص فقط از داده‌های بارندگی استفاده شده و پارامترهایی مانند تبخیر - تعرق و درجه هوا که باعث تشدید شدت خشکسالی می‌شوند مدنظر قرار نگرفته‌اند (۲). بر این اساس، در مناطق خشک و نیمه خشک که میانگین بارندگی در آن‌ها کم و تبخیر - تعرق بالا است، دچار مشکل شده و با وقوع یک بارندگی به مقدار کم، عملاً مقدار آن از منفی به مثبت تغییر کرده و شرایط مرطوب را نشان می‌دهد، درحالی‌که واقعیت غیر از این است. باتوجه به مزایای منطق فازی که راهکار مناسبی را جهت مقابله با عدم قطعیت‌ها ارائه می‌کند و از نظر بسیاری از دانشمندان منطق فازی به عنوان ابزار قابل قبولی در دنیا بوده که در زمینه‌های وسیعی کاربرد دارد، سعی شده تا از منطق فازی برای تلفیق اجزا، مدل پایش خشکسالی استفاده شود (۲۳). امروزه مدل‌ها در سطح وسیعی برای کمک به مدیریت منابع طبیعی و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌هایی که در توسعه آن‌ها عدم قطعیت بسیار مهم است (۱۰). تحقیقاتی که در زمینه مختلف فازی ارائه شده می‌توان به تحقیقات پستی و همکاران، پنگراز و همکاران و کیسی اشاره کرد (۱۲، ۱۷ و ۱۸). نتایج تحقیقی که به کاربرد شاخص جدید خشکسالی بارندگی و تبخیر - تعرق استاندارد شده (SPEI) پرداخته شده است، نشان داد که درجه حرارت در خشکسالی‌های تابستانی منطقه کاملاً مشهود است، به طوری که آنومالی درجه حرارت (موج گرما) باعث افزایش ET_0 می‌شود. همچنین، بررسی تکامل خشکسالی در طول پنج دهه اخیر نشان داد که فراوانی وقوع خشکسالی‌ها افزایش یافته است و دوره‌های خشک در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ به واسطه افزایش ET_0 در طول تابستان تقویت شده است (۱۹). استفاده از منطق فازی، شاخص بارندگی و تبخیر - تعرق استاندارد شده^۱ (SEPI) برای اولین بار در جهان توسعه یافت و به پایش خشکسالی‌های ایستگاه همدیدی

مشکل افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شده است، به طوری که از سال ۱۳۶۵ به بعد وزارت نیرو دشت فوق را دشت ممنوعه اعلام نموده است (۳).

در محل خروجی دشت (حسین آباد جنگل) واقع در قسمت غربی دشت قرار دارد که حدود ۱۰۵۰ متر از سطح دریا بلندتر است (۶). دشت نیشابور در سال‌های اخیر به علت استفاده زیاد از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با



شکل ۱ - منطقه مورد مطالعه

بودن سری داده‌های ثبت شده انجام شد و در موارد مورد نیاز، داده‌ها اصلاح و یا در صورت مفقود و ناقص بودن، از روش نسبت‌ها بازسازی شدند.

تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش هارگریوز - سامانی محاسبه شد و برای محاسبه بارندگی و تبخیر - تعرق مرجع متوسط دشت از روش میان‌یابی عکس فاصله^۲ (IDW) استفاده شده است (۷).

داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

لایه اطلاعات بارندگی حوضه و تبخیر - تعرق مرجع آمار و اطلاعات مورد استفاده برای محاسبه بارندگی و تبخیر - تعرق مرجع متوسط ماهانه دشت نیشابور از اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی در طول دوره آماری ۸۵-۱۳۵۲ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). بعد از تعیین ایستگاه‌ها، آزمون همگنی داده‌ها به روش غیرگرافیکی (روش رانتست^۱) برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و همچنین همگن

پایش خشکسالی

شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)

برای بررسی شرایط دوره‌های خشک و بررسی روند تغییرات طولانی‌مدت و تأثیر آن روی سطح آب زیرزمینی در این تحقیق، از شاخص SPI استفاده شد (۱۴ و ۱۵).

در این تحقیق، بری محاسبه SPI ابتدا مجموعه‌ای از متوسط دوره‌ها برای تعیین مجموعه داده با مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲، ۴۸، ۵۴، ۶۰، ۶۶، ۷۲، ۷۸ و ۸۴ ماهه ارائه شد. انتخاب این مجموعه‌ها با توجه به تأثیر کمبودهای بارندگی بر هر یک از انواع منابع آبی، مشخص می‌شود. همچنین جهت محاسبه شاخص تبخیر - تعلق استاندارد شده^۱ (SEI) با مقیاس‌های زمانی اشاره شده، از گذاشتن مقادیر تبخیر - تعلق متوسط ماهانه در شاخص ارائه شده توسط مکی و همکاران (۱۹۹۳) به دست آمد (۱۴).

شاخص بارندگی و تبخیر - تعلق استاندارد شده (SEPI)

در مناطق خشک و نیمه خشک که دو عامل کمبود بارندگی و افزایش تبخیر - تعلق بیشترین تأثیر را در ایجاد خشکسالی دارد، ارائه یک مدل تحلیلی فازی و یک شاخص جدید پایش خشکسالی به نام شاخص SEPI^۲ الزامی است. ارائه شاخص مذکور علی‌رغم سادگی محاسباتش یک شاخص قابل اعتماد خواهد بود، زیرا علاوه بر بارندگی، تبخیر - تعلق هم به عنوان یک فراسنج مؤثر بر تغییر شدت خشکسالی در ارائه شاخص مدنظر قرار می‌گیرد که با طبیعت خشکسالی هماهنگی بیشتری دارد.

لذا پس از محاسبه دو شاخص SPI و SEI، شاخص ترکیبی SEPI از تلفیق دو شاخص مذکور به صورتی مشتق شد که خصوصیات دو شاخص SPI و SEI را به طور کامل دارا باشد. در مرحله تلفیق، دو شاخص SPI و SEI با توجه به اینکه مقادیر این دو شاخص به صورت متغیرهای زبانی^۳ طبقه‌بندی شده و با توجه به مزایای منطق فازی در تلفیق و

ترکیب متغیرهای زبانی، دو شاخص SPI و SEI به صورت فازی ترکیب شدند تا شاخص SEPI تولید شد.

مدل فازی ارائه شده جهت پایش خشکسالی

برای ترکیب شاخص‌های SPI و SEI با استفاده از سیستم استنتاج فازی و با توجه به معماری مدل‌های فازی، در ابتدا مدل فازی به صورت شکل (۲) ارائه شد:

با بررسی کلی بر روی طبقات ارائه شده برای دو شاخص SPI و SEI، می‌توان زیرمجموعه‌های فازی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)); x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1] \} \quad (۱)$$

در این رابطه، X مقدار شاخص و $\mu_A(x)$ مقدار تابع عضویت x در A است.

با توجه به تعریف فوق و طبقه‌بندی ارائه شده برای شاخص‌ها، نهایتاً توابع عضویت مجموعه‌های فازی خشکسالی خیلی شدید، شدید، متوسط و ملایم به صورت شکل (۳) تعریف شدند.

برای ترکیب توابع عضویت طبقات مختلف خشکسالی و ارائه قوانین فازی مورد استفاده در مدل فازی در ابتدا طبقات مختلف دو شاخص SPI و SEI در مقابل همدیگر قرار گرفتند. از قرار دادن طبقات در مقابل همدیگر طبقات جدید مربوط به ترکیب‌های مختلف دو شاخص که به عنوان طبقات شاخص SEPI می‌باشد، مشخص شدند. پس از تعیین قوانین فازی و در پی آن تعیین قیاس و نتیجه، با استفاده از قیاس استثنائی تعمیم یافته^۴ برای سیستم استنتاج فازی و نیز استفاده از روش مدانی^۵ در ترکیب قوانین، خروجی مدل به صورت فازی تعیین شد. سپس با توجه به ترکیبات مختلف توابع فازی و درجه تأثیر هر یک از ترکیبات در نتایج نهایی، خروجی مدل فازی با استفاده از روش نافازی سازی^۶ مرکز ثقل به صورت ترد^۷ محاسبه شد.

4 - Generalized modus ponens

5 - Mamdani

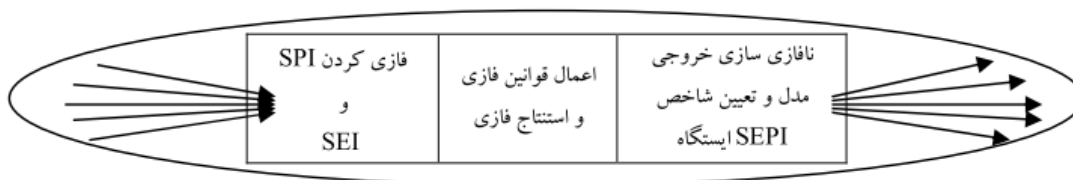
6 - Defuzzification

7 - Crisp

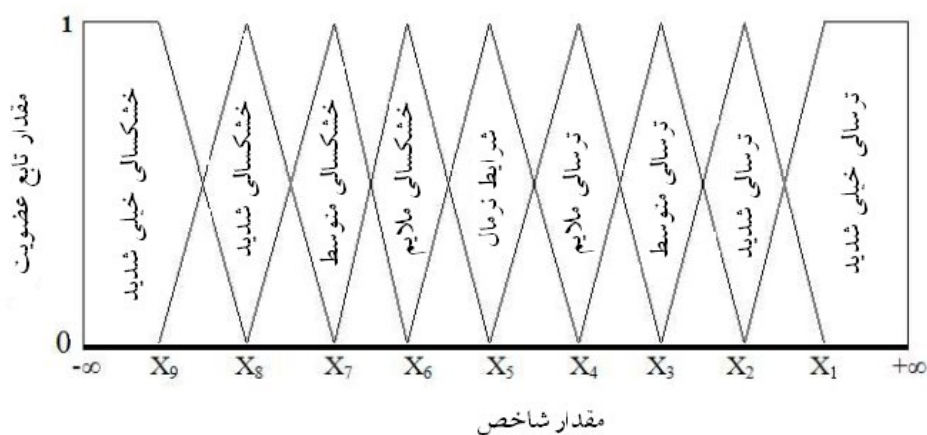
1 - Standardized Evapotranspiration Index

2 - Standardized Evapotransprecipitation Index

3 - Linguistic Variables



شکل ۲ - معماری کلی مدل فازی پایش خشکسالی



شکل ۳ - توابع فازی شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SEI و SPI

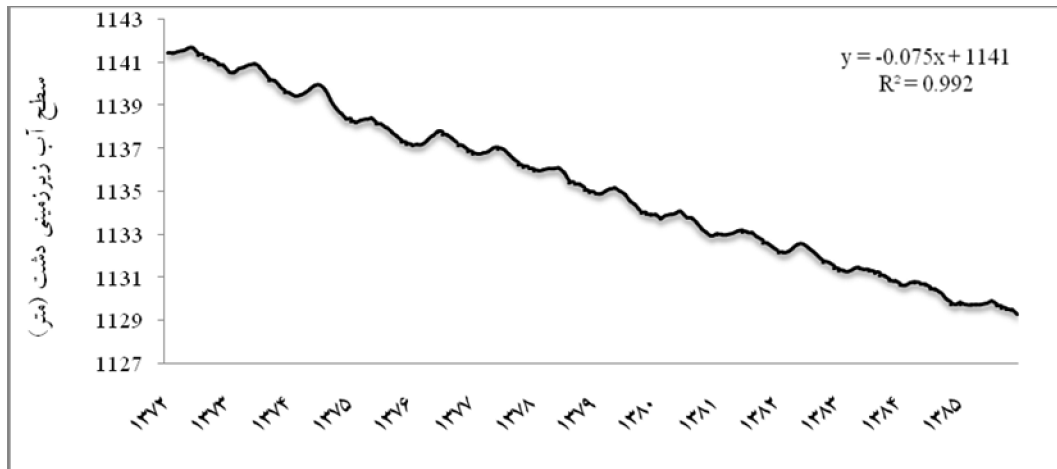
نتایج و بحث

بررسی روند سطح آب زیرزمینی دشت

نتایج آزمون ناپارامتری من - کندال نشان می‌دهد که در کلیه ماه‌ها بارندگی فاقد روند می‌باشد، ولی شیب سطح آب زیرزمینی دشت دارای روند منفی است و در سطح پنج درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). به همین علت، برای یافتن همبستگی بین سطح آب زیرزمینی و شاخص SEPI و بارندگی این روند از داده‌ها حذف شود. عدم قطعیت متغیرهای هیدرولوژی از جمله بارندگی و سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که سری زمانی مورد مطالعه تصادفی است و برای خارج کردن روند از آن و همچنین بررسی اثرات فصلی از روش برون‌یابی منحنی روند برای داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت استفاده شد (شکل ۵) (۷).

اطلاعات مربوط به سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور

شکل (۴) هیدروگراف سطح آب زیرزمینی دشت را در دوره آماری ۸۵-۱۳۷۲ نشان می‌دهد. در این دوره، متوسط سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور برابر ۱۲/۲۳ متر افت داشت که میزان متوسط افت سالانه ۰/۸۷ متر می‌باشد. تغییر شیب سطح آب در دو سری زمانی متوالی حاکی از تغییر شبکه تیسن در سال‌های ۷۶-۱۳۷۵ می‌باشد، برای حذف اثر تغییر شبکه تیسن مقدار به دست آمده از کل سری‌های زمانی سطح آب زیرزمینی در سال‌های قبل از تغییر شبکه تیسن کم گردید. سپس برای بررسی روند سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور در مقیاس ماهانه از آزمون ناپارامتری من - کندال استفاده شد (۹).



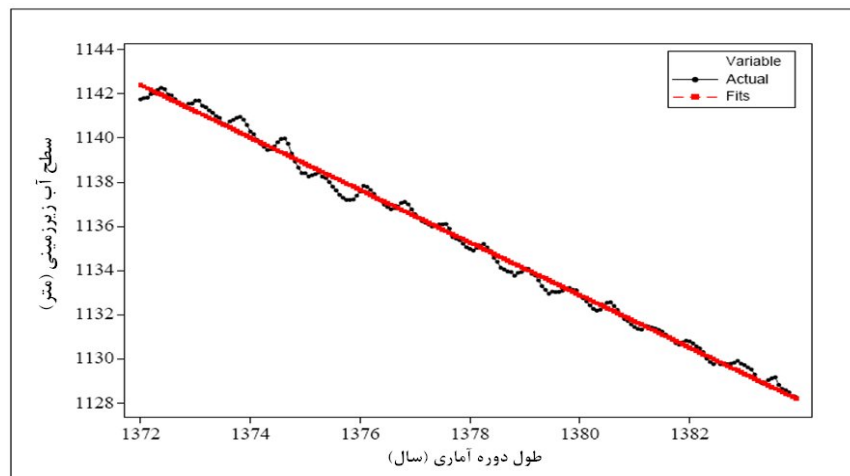
شکل ۴ - هیدروگراف واحد سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور در طول دوره آماری ۸۵-۱۳۷۲

جدول ۱ - روند تغییرات بارندگی و آبنمود دشت نیشابور با استفاده از آزمون من - کندال

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	ماه	سطح آب زیرزمینی
-۵/۳۵	-۵/۳۴	-۵/۳۵	-۵/۳۵	-۵/۳۵	-۵/۳۶	-۵/۳۵	-۵/۳۵	-۵/۳۵	-۵/۳	-۵/۳۳	-۵/۳۵	مقدار آماره	سطح آب زیرزمینی
منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	منفی	روند	سطح آب زیرزمینی
۰/۶۰	-۰/۷۲	-۰/۲۵	۱/۵۵	-۰/۵۷	۰/۰۴	۰/۱۰	۱/۱۴	۰/۴۰	-۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۷۷	مقدار آماره	بارندگی
ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	روند	بارندگی

معادله خط روند برازش داده شده بر داده‌های آبنمود (۲) $Y_t = 141.63 - 0.0748 \times t$ p-Value = 0.000

دشت نیشابور برابر است با: در این رابطه، Y_t سطح آب زیرزمینی و t زمان می‌باشد.



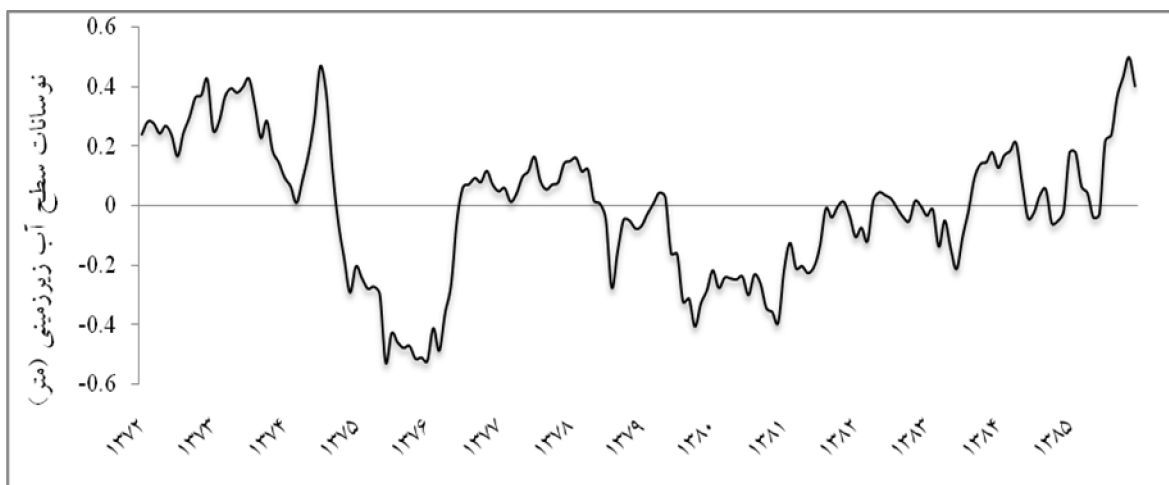
شکل ۵ - خط روند برازش داده شده بر داده‌های آبنمود دشت نیشابور

عضویت شاخص‌های SEI و SPI، ترکیب دو شاخص با وزن‌های مختلف باتوجه به تأثیر بارندگی و درجه حرارت بر شدت خشکسالی مدنظر قرار گرفت (۲). پس از تعریف تابع فازی طبقات خشکسالی براساس شاخص SEPI، باتوجه به نحوه ارتباط بین طبقات خشکسالی و ترسالی حاصل از دو شاخص SPI و SEI با شاخص SEPI، مدل فازی نهایی با ۸۱ قانون تعریف شد که در هر مرحله حداکثر چهار و حداقل دو قانون فعال می‌شود (شکل ۷).

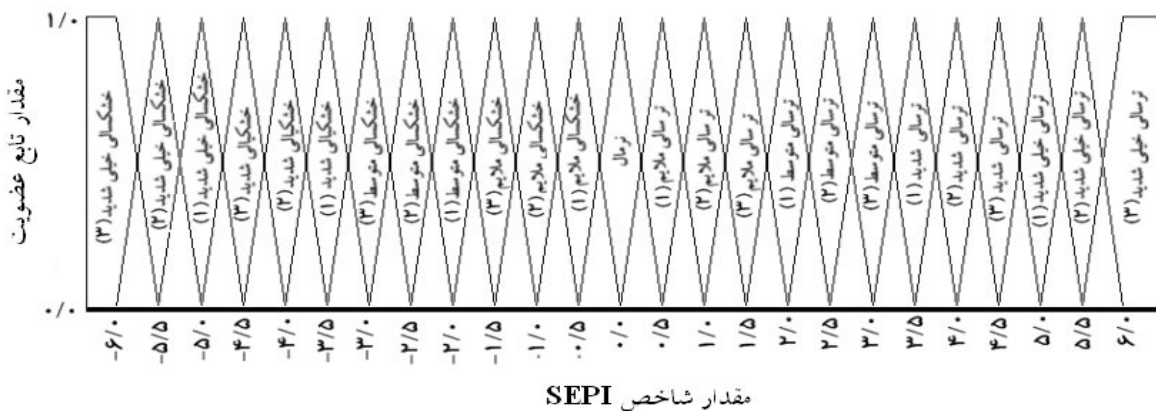
شکل (۶) نشان‌دهنده نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت می‌باشد که در سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۷۶، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ سطح آب زیرزمینی افت شدیدی داشته است.

محاسبه شاخص SEPI

برای محاسبه شاخص تبخیر - تعرق استاندارد شده (SEPI) از تلفیق دو شاخص SPI و SEI در مقیاس‌های زمانی متفاوت استفاده شد. در آغاز مرحله تلفیق و برای ورود داده‌ها به مدل فازی، مقادیر دو شاخص مذکور، به صورت متغیرهای گفتاری طبقه‌بندی شدند (شکل ۳). پس از تعیین توابع



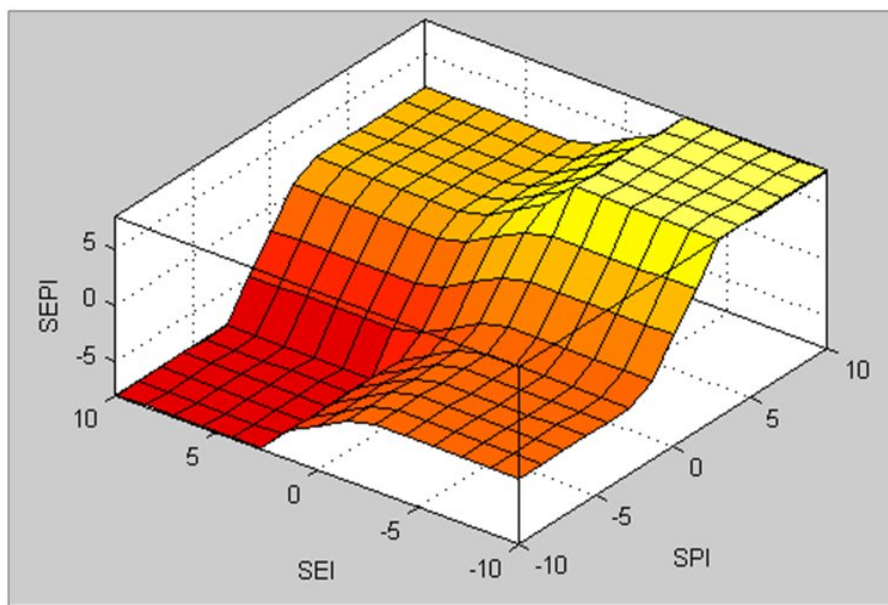
شکل ۶ - نوسانات آب‌نمود دشت نیشابور بعد از حذف روند



شکل ۷ - طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی براساس شاخص SEPI (۲)

کاهش (افزایش) SPI و افزایش (کاهش) SEI مقدار SEPI به چه نحوی کاهش (افزایش) می‌یابد.

از ترکیب دو شاخص SPI و SEI، سطح منحنی مشخص شد که سازنده مقادیر شاخص SEPI می‌باشد، به دست می‌آید (شکل ۸). منحنی به دست آمده به خوبی نشان می‌دهد که با

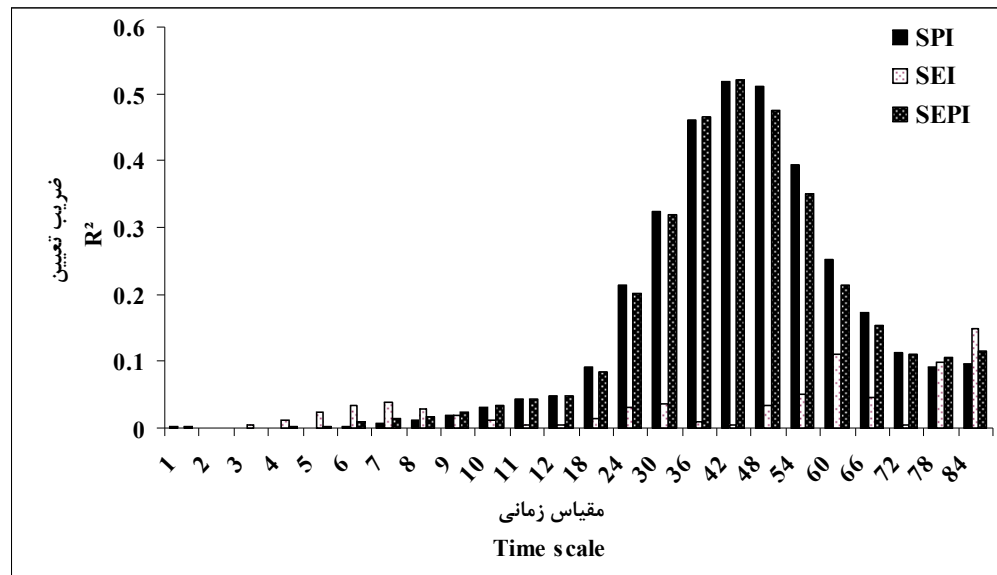


شکل ۸ - سطح منحنی حاصل از ترکیب دو شاخص SPI و SEI برای محاسبه شاخص SEPI

دست آمد، به طوری که میزان همبستگی ۰/۳۴ می باشد. نتایج همبستگی بین شاخص SPI با نوسانات سطح آب زیرزمینی مشابه نتایج شاخص SEPI می باشد، لذا در دشت نیشابور مقیاس های زمانی بلندمدت (بیشتر از ۳۶ ماه) منجر به خشکسالی هیدرولوژیک خواهد شد. نتایج به دست آمده با نتایج سایر محققین سازگار بود، به طوری که نشان داده شد که تغییرات اقلیمی متفاوت روی در دسترس بودن منابع آب حوضه بالادست رودخانه Tagus مؤثر است و از دو شاخص SPI و شاخص بارندگی و تبخیر - تعرق استاندارد شده (SPEI) استفاده شده است (۱۳). بیشترین همبستگی پیرسون با جریان ورودی، خروجی و ذخیره شده، در حوضه مورد مطالعه به ترتیب در مقیاس های زمانی ۳-۵، ۴۸ و ۳۳ ماهه به دست آمده است (۱۰). همچنین نتایج دیگر تحقیقات نشان داد که SPI با مقیاس زمانی بلندمدت با سطح آب زیرزمینی رابطه دارد، به طوری که نتایج همبستگی پیرسون بین SPI و سطح آب زیرزمینی واقع در بخش های جنوب شرقی، جنوب غربی، مرکزی و غربی منطقه با مقیاس زمانی به ترتیب ۱۸ (R = ۰/۲۴)، ۲۴ (R = ۰/۳۸)، ۱۲ (R = ۰/۵۲) و ۵ (R = ۰/۵۲) رابطه داشت (۲۱).

رابطه بین شاخص SPI، SEI و SEPI و سری زمانی سطح آب زیرزمینی دشت

شکل (۹) نشان دهنده نتایج ضریب تعیین (R^2) بین شاخص SPI، SEI و شاخص SEPI در مقیاس های زمانی مختلف با سری زمانی سطح آب زیرزمینی فاقد روند دشت می باشد. نتایج نشان می دهد که رابطه بین سطح آب زیرزمینی و شاخص SEPI در مقیاس های زمانی کوتاه بسیار ضعیف می باشد، به طوری که تا مقیاس ۱۲ ماه این همبستگی کمتر از $R^2 = ۰/۰۴۷$ می باشد. از SEPI با مقیاس زمانی ۱۲ ماه به بالا همبستگی ها روند رو به بالایی به خود گرفت، به طوری که در SEPI با مقیاس زمانی ۴۲ ماه به بیشترین همبستگی خود یعنی $R^2 = ۰/۵۱$ می رسد. از این مقیاس به بعد همبستگی ها کاهش می یابد و از یک روند کاهشی تبعیت می کند. نتایج تأخیرهای مختلف سطح آب زیرزمینی و SEPI₄₂ نشان داد که بیشترین همبستگی بین شاخص و سطح آب زیرزمینی به طور هم زمان اتفاق می افتد و با تأخیر دادن سطح آب زیرزمینی این همبستگی بیشتر کاهش می یابد. این در حالی است که بیشترین همبستگی با توجه به ضریب تعیین بین شاخص SEI و سطح آب زیرزمینی در مقیاس زمانی بالاتری ۶۰ ماه به



شکل ۹ - ضریب تعیین بین داده‌های متوالی اصلاح شده سطح آب زیرزمینی دشت (استاندارد شده) و شاخص SPI، SEI و SEPI در مقیاس‌های زمانی مختلف

و در این دوره سطح آب زیرزمینی افزایش یافته است (شکل ۱۰). کاهش سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۳ و مقادیر مثبت شاخص SPI در این سال نشان می‌دهد که برداشت بیش از حد از سطح آب زیرزمینی به قدری زیاد بوده است که حتی بارندگی‌های به وجود آمده در آن سال و ترسالی نیز نتوانسته این مقدار کاهش بیش از اندازه را جبران کند و در این سال علی‌رغم ترسالی سطح آب زیرزمینی کاهش یافته است. بنابراین نتایج به دست آمده، شاخص SEPI به نحو مطلوب‌تری نوسانات سطح آب زیرزمینی را نسبت به شاخص SPI نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

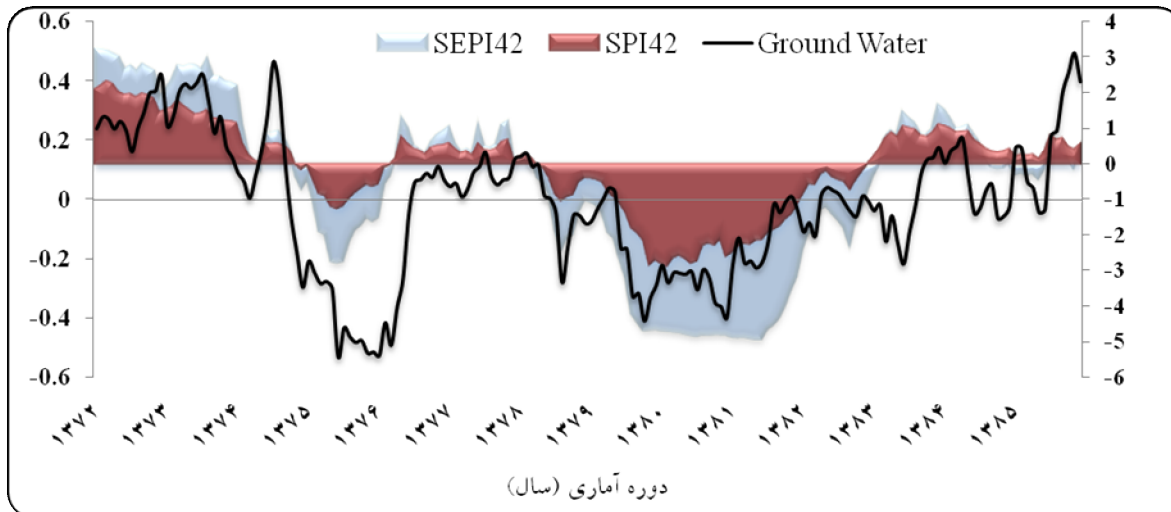
شکل (۱۱) نشان‌دهنده همبستگی (R) بین شاخص SEPI و نوسانات سطح آب زیرزمینی برای ماه‌های مختلف می‌باشد، به طوری که کمترین همبستگی در مقیاس‌های زمانی کمتر از ۱۲ ماه می‌باشد و بیشترین همبستگی برای ماه‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی ۳۶ تا ۴۸ ماه می‌باشد ($R > 0.7$). در ماه‌های

در شکل (۹) همبستگی بالای بین شاخص SEPI با مقیاس زمانی ۴۲ ماه و سطح آب زیرزمینی ($R^2 = 0.51$) نشان داده شده و حاکی از آن است که خشکسالی عامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور می‌باشد، ولی به تنهایی عامل بحران نمی‌باشد بلکه اضافه برداشت‌ها از سطح آب زیرزمینی نقش اصلی را ایفا می‌کند. همان‌طور که اشاره شد خشکسالی از عوامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی دشت می‌باشد، به طوری که خشکسالی شدیدی که در سال‌های ۸۲-۱۳۷۹ رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در این سال‌ها به شدت کاهش یافته است (شکل ۱۰). همچنین، خشکسالی جزئی سال ۱۳۷۵ نشان می‌دهد که در این سال سطح آب زیرزمینی با شدت بیشتری نسبت به خشکسالی شدیدتر سال‌های ۸۲-۱۳۷۹ کاهش یافته است که نشان می‌دهد در این سال برداشت زیادی از سطح آب زیرزمینی دشت رخ داده است. لازم به ذکر است که در این سال شاخص SEPI دارای هم‌پوشانی بهتری نسبت به شاخص SPI بوده است و نشان می‌دهد که در این سال با کاهش بارندگی و بالا بودن درجه حرارت، تبخیر - تعرق دارای تأثیر بوده است. پس از این خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ دوره‌های خشک جای خود را به ترسالی‌ها داده است

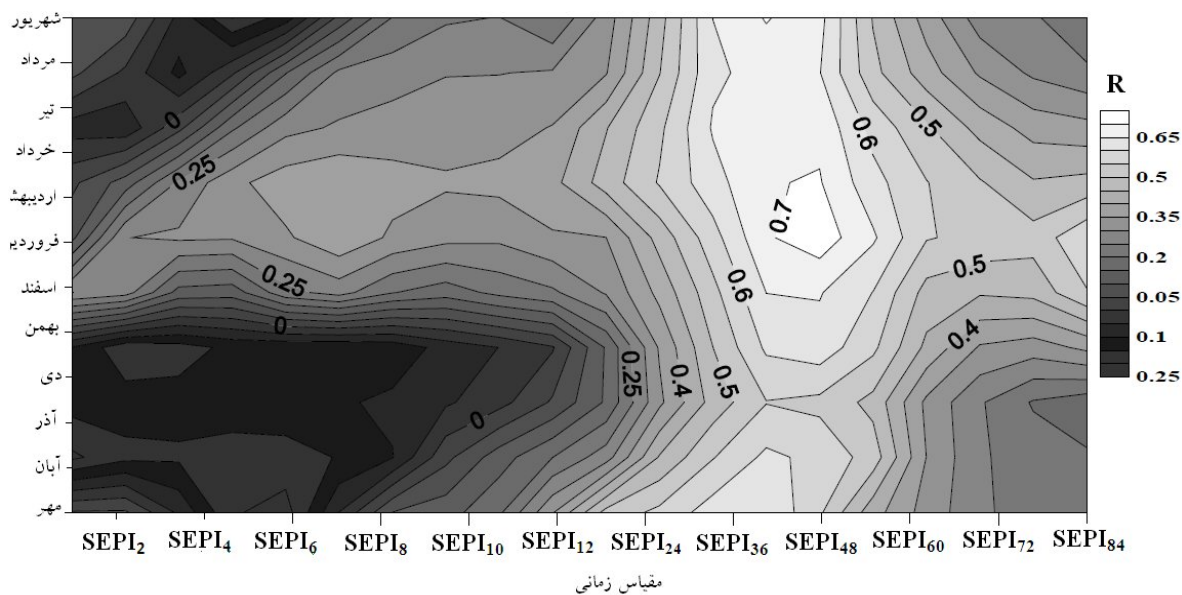
۱ - در این تحقیق، روند ناشی از اضافه برداشت از داده‌های سطح آب زیرزمینی حذف گردید، اما حذف این روند به این معنی نیست که به‌طورکلی عامل اضافه برداشت از داده‌ها حذف شده است، بلکه ما روند عینی که قابل مشاهده است را حذف کردیم.

مقیاس‌های زمانی کوتاه هم از همبستگی بیشتری نسبت به سایر ماه‌های سال برخوردار است. در ماه‌های تابستان مقیاس‌های زمانی کوتاه از همبستگی کمتری برخوردار است. به‌طور کلی، برای همه ماه‌های سال، مقیاس‌های زمانی بلند همبستگی بیشتری بین شاخص SEPI و نوسانات سطح آب زیرزمینی وجود دارد.

اسفند، فروردین و اردیبهشت در مقیاس‌های زمانی بلند (۴۲ ماهه)، از همبستگی بیشتری به نسبت سایر مقیاس‌ها برخوردار است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی پیرسون در این ماه‌ها به ترتیب ۰/۷۰۳، ۰/۷۴۹ و ۰/۷۶۵ به دست آمد که می‌توان علت آن را در بارش زیاد در این ماه‌ها از سال اشاره کرد که باعث تغذیه دشت خواهد شد. همچنین در این ماه‌ها



شکل ۱۰ - سری زمانی سطح آب زیرزمینی استاندارد شده در مقابل SEPI، SPI در مقیاس ۴۲ ماهه (۱۳۷۲-۸۵)



شکل ۱۱ - ضریب همبستگی بین نوسانات آب زیرزمینی و شاخص SEPI در مقیاس ماهانه (همبستگی در سطح پنج درصد معنی‌دار است)

نتیجه گیری

است. از آنجا که اثر بارندگی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی ۴۲ ماه طول می‌کشد، در سالی که در منطقه خشکسالی رخ می‌دهد و بارندگی کاهش می‌یابد، باتوجه به آگاهی از وضعیت دشت با شاخص توسعه یافته SEPI و حتی شاخص SPI، برای ماه‌های آتی که بر سطح آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد، از شیوه‌های مدیریتی درست استفاده کنیم.

خشکسالی‌ها در دشت نیشابور عامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی دشت می‌باشد، اما به تنهایی عامل بحران نبوده بلکه برداشت بی‌رویه از دیگر عوامل است. در نتیجه خشکسالی‌های اقلیمی در کوتاه‌مدت بر روی سطح آب زیرزمینی اثری ندارند، اما در بلندمدت باعث افت سطح آب زیرزمینی می‌شوند. افزایش خشکسالی‌ها به خصوص در سال‌های اخیر باعث افزایش برداشت از سطح آب زیرزمینی و در نتیجه شدت افت سطح آب زیرزمینی دشت شده است. در سال ۱۳۸۳ علی‌رغم افزایش بارندگی‌ها در این سال و ترسالی به وجود آمده باز هم سطح آب زیرزمینی افت زیادی داشت که این امر نشان می‌دهد برداشت بی‌رویه از سطح آب زیرزمینی به قدری زیاد بوده که بارندگی‌های به وجود آمده نیز بر روی کاهش افت آن کم تأثیر بوده است.

نتایج تحلیل‌ها به صورت سری زمانی متوالی نشان داد که تغییرات سطح آب زیرزمینی با مقادیر شاخص SEPI از همبستگی بیشتری در مقیاس‌های مختلف زمانی نسبت به شاخص SPI برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات سطح آب زیرزمینی بیشترین همبستگی را در مقیاس زمانی ۴۲ ماهه برای هر دو شاخص به دست می‌دهد ($R^2 = 0/51$).

نتایج تحلیل‌ها به صورت ماه به ماه نشان داد که ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت در مقیاس‌های زمانی بلند (۴۲ ماهه) از همبستگی بیشتری به نسبت سایر ماه‌ها برخوردار است، به طوری که ضریب همبستگی پیرسون در این ماه‌ها به ترتیب ۰/۷۰۳، ۰/۷۴۹ و ۰/۷۶۵ به دست آمد و به طور کلی، برای سایر ماه‌های سال نیز مقیاس‌های زمانی بلند از همبستگی و تأثیر بیشتری بر نوسانات سطح آب زیرزمینی برخوردار است.

در سال ۱۳۷۶-۱۳۷۵ علاوه بر اینکه در دشت خشکسالی رخ داده است، سطح آب زیرزمینی افت چشم‌گیری داشته که نشان می‌دهد که در این سال‌ها باتوجه به بارندگی کم و افزایش دما مجبور به اضافه برداشت از آب زیرزمینی شده

منابع مورد استفاده

۱. ایزدی ع.، داوری ک.، علیزاده ا. و قهرمان ب (۱۳۸۷) کاربرد مدل داده‌های ترکیبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی. آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۲): ۱۴۳-۱۳۳.
۲. انصاری ح.، داوری ک. و ثنائی‌نژاد س. ح (۱۳۸۹) پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEPI). توسعه یافته بر اساس منطق فازی. آب و خاک. ۲۴(۱): ۵۲-۳۸.
۳. حسینی ا.، فرج‌زاده م. و ولایتی س (۱۳۸۴) تحلیل بحران آب در نیشابور با رویکرد برنامه‌ریزی محیطی. کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان.
۴. علیزاده ا (۱۳۸۵) اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد. ۸۰۸ ص.
۵. کردوانی پ (۱۳۸۰) خشکسالی و راه‌های مقابله با آن در ایران. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ۳۹۲ ص.
۶. ولایتی س. و توسلی س (۱۳۷۰) منابع و مسائل آب در ایران. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
۷. نادریان‌فر م (۱۳۸۹) بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط اقلیمی مختلف. دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۸. نادریان‌فر م. و انصاری ح (۱۳۹۰) ارزیابی اثرات شدت - مدت خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی مختلف بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نیشابور). مهندسی منابع آب. ۳(۹): ۱۶-۱.

- 9 . Hamed KH (2008) Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Hydrology*. 349: 350-363.
- 10 . Jakeman AJ, Letcher RA, and Norton JP (2006) Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*. 21: 602-614.
- 11 . Khan S, Gabriel HF and Rana T (2008) Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation Drainage System*. 22: 159-177.
- 12 . Kisi O (2010) Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration. *Irrigation and Drainage Engineering*. 136(3): 175-183.
- 13 . Lorenzo-Lacruz J, Vicente-Serrano SM, Lopez-Moreno JI, Begueria S and Garcia-Ruiz JM (2010) The impact of drought water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Hydrology*. 386: 13-26.
- 14 . McKee TB, Doesken NJ and Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, Eight Conf. On Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. Pp. 179-184.
- 15 . McKee TB, Doesken NJ and Kleist J (1995) Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In: Proc. 9th Conf. on Applied Climatology, American Meteorological Society, Massachusetts. Pp. 233 - 236.
- 16 . Panda DK, Mishra A, Jena SK, James BK and Kumar A (2007) The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India. *Hydrology*. 343: 140-153.
- 17 . Pesti G, Shrestha BP, Duckstein L and Bogardi I (1996) A fuzzy rule-based approach to drought assessment. *Water Resources Research*. 32: 1741-1747.
- 18 . Pongracz R, Bogardi L and Duckstein L (1999) Application of fuzzy rule-based modeling to regional drought. *Hydrology*. 224: 100-114.
- 19 . Potop V and Možný M (2011) The application a new drought index standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech republic. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí*. Skalní mlýn, 2. - 4.2.
- 20 . Shahid SH and Hazarika MK (2009) Groundwater Drought in the Northwestern District of Bangladesh. *Water Resource Managment DOI 10.1007/s11269-009-9534-y*.
- 21 . Szalai S, Szinell Cs and Zoboki J (2000) Drought Monitoring in Hungary. In: Early warning systems for drought preparedness and drought management. WMO, Geneva. Pp. 161-176.
- 22 . Vicente-Serrano SM and Lopez-Moreno JI (2005) Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9: 523-533.
- 23 . Zimmermann HJ (1995) Fuzzy set theory and its application. Dordrecht: Kluwer Nijhoff Publishing, The Netherlands.

Evaluating the groundwater fluctuations with fuzzy Standardized Evapotranspiration Index (SEPI)

H. Ansari¹ and M. Naderianfar^{2*}
(E-mail: Naderian.mohamad@yahoo.com)

Abstract

In recent decades, Neyshabour basin as a semi-arid climate has faced with dramatic increasing of groundwater withdrawal. So, water demand management is important in this Basin. In this study, the effects of evapotranspiration and rainfall on groundwater fluctuations have been considered with 22 Rain gage and Evaporation gage station data during 1973-2006. The average amount of rainfall and evaporation on Plain calculated with assistance of IDW method. Results of Man-Kendall test showed the groundwater slope in the plain has a negative trend, while precipitation has no trend. Therefore, groundwater level detrended with extrapolation method to could find the correlation between cumulative evapotranspiration and rainfall with groundwater level. Standardized precipitation index and fuzzy standardized evapotranspiration index devised for evaluating the effects of rainfall and evapotranspiration on the groundwater. Successive time series analysis shows that groundwater variations have a high Correlation with the fuzzy standardized evapotranspiration index which is more than standardized precipitation index in different time scales.

Keywords: Evapotranspiration, Fuzzy standardized evapotranspiration index, Groundwater level, Man-Kendall test, Precipitation

1 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad - Iran

2 - Ph.D. Student, Department of Water Engineering Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad – Iran

(Corresponding Author *)