



پایش خشکسالی بر مبنای شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم

حمید زارع ایبانه^۱ - محمد قبائی سوق^۲ - ابوالفضل مساعدی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶

چکیده

ویژگی‌های خشکسالی به عنوان یکی از وقایع محیطی، در دوره‌های آبی ممکن است تحت تأثیر تغییرات اقلیمی تغییر نماید. در این تحقیق با بررسی شاخص‌های بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شناسایی خشکسالی (RDI) و بارش استاندارد شده (SPI)، از شاخص SPEI برای پایش وضعیت خشکسالی ایستگاه سینوپتیک همدان تحت تأثیر تغییر اقلیم در دهه‌های آبی استفاده شده است. بدین منظور دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ به عنوان دوره پایه انتخاب و شبیه‌سازی شرایط اقلیم آبی بر مبنای سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 و اجرای گروهی داده‌های ۵ مدل گردش عمومی جو با استفاده از مدل LARS-WG5 در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۴۰ انجام شد. با شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما، شاخص‌های SPEI، RDI و SPI در مقیاس‌های زمانی سالانه و همچنین ۱ و ۳ و ۶ ماهه (کوتاه‌مدت) و ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه (بلندمدت) برای دوره‌های پایه و آبی محاسبه و ارتباط بین آن‌ها بررسی گردید. در ادامه، با پایش وضعیت‌های رطوبتی از طریق شاخص SPEI، ویژگی‌های دوره‌های خشک و مرطوب بر مبنای تئوری ران استخراج و برای دوره‌های پایه و آبی با هم مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی اجرای گروهی مدل‌ها نشان داد طی سه دهه آینده بر اساس نتایج سناریوی محتمل A2، دمای متوسط و بارش نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۲/۵ درصد افزایش می‌یابند. پایش وضعیت رطوبتی بر مبنای شاخص SPEI نیز نشان‌دهنده تغییرات زیاد شرایط رطوبتی در دهه اول پیش‌بینی، نسبت به دهه‌های دوم و سوم می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود در مقیاس‌های بلندمدت تعداد دوره‌های خشک کاهش و تداوم طولانی‌ترین دوره خشک و متعاقب آن حجم کمبودها نسبت به دوره پایه افزایش یابند. علاوه بر این انتظار می‌رود مجموع حجم مازادها در دوره‌های مرطوب نسبت به دوره پایه کاهش یابد که می‌تواند بیانگر افزایش کمبود رطوبتی در دهه‌های آبی باشد.

واژه‌های کلیدی: اجرای گروهی، تغییر اقلیم، تئوری ران، خشکسالی، شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

مقدمه

سایر پدیده‌های مخاطره‌آمیز، تعیین دقیق زمان شروع و پایان خشکسالی دشوار است و اثرات آن به آرامی نمایان و به‌طور گسترده در ناحیه جغرافیایی وسیعی گسترش می‌یابد. از طرفی خشکسالی خود می‌تواند سبب بروز و یا تشدید اثرات پدیده‌های مخاطره‌آمیز دیگر مانند سیل، تندباد و طوفان گردد (۱۴ و ۳۴).

در سال‌های پس از انقلاب صنعتی با توسعه روزافزون صنایع و به سبب آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، غلظت گازهای گلخانه‌ای به خصوص میزان دی‌اکسیدکربن افزایش یافته است که این امر گرم شدن کره زمین را به همراه داشته است. گرم‌تر شدن کره زمین بر وضعیت دیگر اجزاء سیستم اقلیم اثر گذاشته و پدیده تغییر

زندگی بشر همواره در معرض انواع مخاطرات طبیعی قرار دارد که برخی از آن‌ها ناشی از فرآیندهای آب و هوایی می‌باشند. بررسی پدیده‌های مخاطره‌آمیز طبیعی نشان می‌دهد که خشکسالی در رده نخست فهرست پدیده‌های مخاطره‌آمیز طبیعی قرار دارد (۵). برآورد اثرات و خسارات خشکسالی تا حد زیادی دشوار می‌باشد، زیرا برخلاف

۱- دانشیار و دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۳- استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: mosaedi@um.ac.ir)

* - نویسنده مسئول:

مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشکسالی که کاربرد زیادی نیز دارند در این امر نهفته است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی داراست. این موضوع با استفاده از داده‌های ۱۱ منطقه واقع در نقاط مختلف اقلیمی جهان توسط ویسنت‌سرانو و همکاران (۳۳) نشان داده شده است.

به‌طور کلی هر پدیده خشکسالی، با سه مشخصه شدت، مدت و فراوانی وقوع شناخته می‌شود. در ارتباط با تاثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مقایسه شرایط اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم مطالعات مختلفی در مقیاس‌های جهانی، قاره‌ای یا منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی انجام شده است. بورک و همکاران (۷) تغییرات خشکسالی شاخص PDSI را بر مبنای مدل HadCM3 و سناریوی A2 در قرن ۲۱ شبیه‌سازی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها مساحت مناطق با خشکسالی شدید از ۱۰ درصد در آغاز قرن ۲۱ به ۴۰ درصد در پایان آن افزایش خواهد یافت. همچنین فراوانی وقایع خشکسالی شدید به دو برابر در انتهای قرن افزایش می‌یابد. همچنین میانگین دوره‌ها تا ۵ برابر افزایش می‌یابد. بورک و برون (۶) بیان می‌دارند همواره عدم قطعیت‌هایی در ارتباط با درصد مساحت مناطق تحت گسترش خشکسالی وجود دارد که بخشی از آن مربوط به چگونگی تغییر شرایط اقلیمی و بخشی نیز از اختلاف نتایج شاخص‌های مورد استفاده برای پایش خشکسالی ناشی می‌شوند. بلنکینسوپ و فولر (۴) برای ارزیابی تغییرات مشخصات خشکسالی (فراوانی، شدت و مدت) در جزایر بریتانیا از ۶ مدل اقلیم منطقه‌ای (RCM) استفاده نمودند. آن‌ها گزارش کردند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تابستانه، افزایش و شدت خشکسالی‌های بلندمدت کاهش می‌یابد. کرونو و همکاران (۱۶) ویژگی‌های خشکسالی در ۱۲ منطقه از استرالیا را بر مبنای شاخص RDI با استفاده از دوازده مدل AOGCM (گزارش چهارم IPCC) تحت سناریوهای A1B (بازده مدل) و A2 (سه مدل) برای دوره صد ساله (۲۰۰۱ تا ۲۱۰۰) بررسی کردند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش کلی فراوانی و وسعت مکانی خشکسالی در بیشتر مناطق مورد بررسی بوده است.

در ایران تحقیقات متعددی در ارتباط با تغییرات پارامترهای اقلیمی نظیر دما، بارش، رطوبت، تبخیر و تعرق، نیاز آبی و آبدی رودخانه‌ها با استفاده از سناریوهای اقلیمی و مدل‌های GCM انجام یافته است. خزانه‌داری و همکاران (۱۵) با شبیه‌سازی داده‌های بارش ایستگاه‌های مختلف در سطح کشور طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ با استفاده از مدل LARS-WG، مقادیر شاخص‌های خشکسالی SPI و دهک را محاسبه نمودند. آن‌ها با تأیید نتایج شاخص‌های مورد استفاده بیان داشتند که طی سال‌های آتی خشکسالی‌های کشور افزایش

اقلیم^۱ را موجب شده است (۱۲). طی ۱۵۰ سال اخیر افزایش کلی دما به مقدار ۰/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد مشاهده گردیده است (۱۳). همچنین گزارش‌های مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی افزایش قابل ملاحظه دما را در نیمه‌ی اول قرن بیستم نشان می‌دهند (۲۹). نتایج مطالعات تجربی نیز نشان می‌دهد افزایش دما به‌طور محسوسی بر شدت خشکسالی تاثیر دارد. نیکولز (۲۱) با تحلیل خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ در استرالیا بر نقش روزهای با درجه حرارت بالا در شدت این پدیده تاکید نمود. ریبرتز و همکاران (۲۴) بیان داشتند اگرچه خشکسالی‌های تابستان ۲۰۰۳ در نواحی مرکزی اروپا ناشی از وقوع بارش‌ها به میزان کمتر از حد نرمال بود اما افزایش شدید دما (۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین درازمدت) طی ماه‌های جون و جولای سبب افزایش خسارت‌ها در بخش‌های کشاورزی، منابع طبیعی و به‌طور چشمگیرتری سبب افزایش مقدار تبخیر و تعرق و تنش‌های آبی گردید. بر اساس نتایج شفیلد و وود (۲۸) انتظار می‌رود در نتیجه افزایش مقدار تبخیر و تعرق، تقاضای آب نیز افزایش یابد که خود می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر وضعیت‌های خشکسالی تأثیرگذار باشد.

بارش و تبخیر و تعرق، دو پارامتر مهم و ضروری برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی می‌باشند (۴). از این رو شاخص‌هایی که علاوه بر باران مقدار تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرند، می‌توانند برای پایش تغییرات اقلیمی دوره‌های فعلی و دوره‌های آتی بر مبنای سناریوهای اقلیمی بکار روند. شاخص‌های مختلفی از متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق برای پایش خشکسالی بهره می‌گیرند که شاخص‌های شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده^۲ (SPEI) از آن جمله هستند.

دوبرسکی و همکاران (۸) نشان دادند که تأثیرات گرمایش جهانی بر خشکسالی بر اساس شاخص PDSI به خوبی بیان می‌گردد در حالی که شاخص SPI (که تنها مبتنی بر بارندگی می‌باشد) نمی‌تواند تغییرات مورد انتظار را به خوبی منعکس سازد. ویسنت‌سرانو و همکاران (۳۳) بیان داشتند شاخص پالم ضمن داشتن مزایای مهم، به علت این که نمی‌تواند اثرات کوتاه مدت و بلندمدت خشکسالی را از طریق پایش در مقیاس‌های زمانی مختلف بدست دهد، دارای ضعف می‌باشد. آن‌ها در ارتباط با شاخص نسبتاً جدید RDI بیان داشتند نسبت بارش به تبخیر و تعرق در این شاخص وقتی مقدار تبخیر و تعرق برابر صفر (در ماه‌های زمستان در مناطق مختلف دنیا) شود تعریف نشده است و دامنه‌ی مقادیر نسبت بکار رفته به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچک می‌باشد که نمی‌تواند نقش دما را منعکس سازد.

1- Climate Change

2-Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

پدیده جهت کاهش اثرات و شدت خسارات آن در سطوح مختلف جامعه کمک و راهکارهایی برای سازگاری با پیشامدهای محتمل به دست آورد. از این رو، هدف از این تحقیق در مرحله اول شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک همدان با اجرای گروهی داده‌های ۵ مدل گردش عمومی جو موجود در مدل مولد اقلیمی LARS-WG5 بر مبنای سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 برای سه دهه آتی می‌باشد تا بر این اساس بتوان در مرحله بعد با بررسی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص‌های خشکسالی SPEI، SPI و RDI، در شرایط تغییر اقلیم، به پایش و تجزیه و تحلیل مشخصات دوره‌های رطوبتی بر اساس تئوری ران در دوره‌ی پایه و سه دهه آتی اقدام نمود.

مواد و روش‌ها

ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک همدان (فرودگاه) در مدار ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و نصف‌النهار ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۷۴۱ متر از سطح دریا قرار دارد. بر اساس آمار دراز مدت ۳۰ ساله، در ایستگاه مذکور میانگین دمای حداقل ۳/۶ درجه سانتی‌گراد، حداکثر ۱۹/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و بارش بلندمدت سالانه ۳۱۹/۲ میلی‌متر می‌باشد که بر اساس نمودار اقلیمی آمبرژه، اقلیم منطقه، نیمه‌خشک سرد محسوب می‌شود. داده‌های مورد نیاز در این تحقیق، شامل مقادیر روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱) می‌باشند که از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور دریافت شدند.

شاخص‌های خشکسالی

طی دهه‌های گذشته محققان، شاخص‌های مختلفی را به منظور پایش وضعیت خشکسالی و بررسی اثرات کمی ناشی از آن توسعه داده‌اند. در تحقیق حاضر به منظور پایش دوره‌های رطوبتی شاخص‌های SPI، RDI و SPEI انتخاب شدند. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ایالت کلرادو آمریکا توسط مک‌کی و همکاران (۱۸) پیشنهاد گردید. برای محاسبه این شاخص، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهیانه یا مجموع بارندگی در هر بازه‌ی زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن را محاسبه نموده سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر شاخص SPI محاسبه می‌شود (۱۷). مهم‌ترین مزیت شاخص SPI، قابلیت محاسبه در مقیاس‌های زمانی مختلف است که باعث می‌شود این شاخص بتواند اثرات دوره‌های کوتاه مدت ذخایر آب (از جمله رطوبت خاک که در

می‌یابد. گل محمدی و مساح بوانی (۱۱) اثر تأثیر تغییر اقلیم بر تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو را بر مبنای شاخص SPI بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ شاهد افزایش بارش و کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. این کاهش شدت خشکسالی، برای مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد و برای خشکسالی‌های ۲۴ ماهه با افزایش دوره بازگشت، شدت خشکسالی بیش از دوره پایه خواهد شد. صالح‌نیا و همکاران (۲۵) با برآورد مقادیر شاخص پالم، خشکسالی حوضه نیشابور را با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰، بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها مقدار بارش در دو دهه اول و دوم به مقدار ۱۲ و ۳۰ درصد افزایش و در دهه سوم ۵ درصد کاهش می‌یابد و دمای حداقل و حداکثر در هر سه دهه نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰) افزایش می‌یابد. همچنین تعداد طبقات خشکسالی در سه دهه آینده کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر مراکز تحقیقاتی کشورهای مختلف دنیا مدل‌های متفاوتی از GCM را برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی توسعه دادند (۱۲). اگرچه مدل‌های اقلیمی ارائه شده برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی از توانمندی بالائی برخوردارند اما همواره شبیه‌سازی‌های انجام شده با عدم قطعیت‌هایی همراه می‌باشد که عمده‌ترین دلایل ایجاد آن‌ها ساده‌سازی‌های صورت گرفته در شرایط اولیه مدل‌ها و پارامترهای مدل بوده که ناشی از عدم شناخت کامل برخی از فرآیندها در سامانه‌ی اقلیمی می‌باشد (۳). بر همین مبنای به منظور کاهش خطا و عدم قطعیت‌های پیش‌بینی و نزدیکی هرچه بیشتر پیش‌بینی‌ها به واقعیت، جدیدترین توصیه‌ی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم به جای استفاده تنها از یک مدل است که اصطلاحاً این کار، اجرای گروهی^۱ نام دارد. زمنف و استراتونویچ (۲۷) با اجرای ۱۵ مدل گردش عمومی موجود در مدل LARS-WG5 به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در انگلستان پرداختند. آن‌ها در نتایج خود بر کاهش معنی‌دار عدم قطعیت پیش‌بینی در اجرای گروهی نسبت به اجرای منفرد مدل‌ها تأکید نمودند. اشرف و همکاران (۳) در تحقیقی با اجرای گروهی ۵ مدل در شمال شرق ایران به شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما و صحت‌سنجی مدل‌ها به صورت منفرد و گروهی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با اجرای گروهی مدل‌ها خطای شبیه‌سازی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

ویژگی‌های خشکسالی ممکن است با گذشت زمان در اثر تغییرات اقلیمی، دچار تغییر شوند. با پیش‌بینی و پایش وضعیت‌های رطوبتی دوره‌های آتی در اثر تغییر شرایط اقلیمی می‌توان به مدیریت این

1- Multi model Ensemble

در گام نهائی مقادیر احتمال تجمعی برای مقادیر D_i به تابع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ تبدیل می‌شوند که برابر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند.

تابع کلاسیک ابرامویچ و استیگان (۱) با استفاده از مقادیر تابع $F(x)$ تخمینی برای مقدار شاخص SPEI می‌باشد.

$$SEPI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (۴)$$

در رابطه ۴ مقدار W از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W = \sqrt{-2\ln(P)} \quad \text{for } P \leq 0.5 \quad (۵)$$

که در آن P مقدار احتمال تجاوز از مقدار D تعیین شده می‌باشد، $F(x) = 1 - P$. اگر مقدار P بزرگ‌تر از 0.5 باشد آنگاه مقدار P با $1 - P$ جایگزین و علامت نتایج SPEI عوض می‌شود. مقدار ضرایب ثابت در معادله ۴ برابرند با $C_0=2.515517$, $C_1=0.802853$, $C_2=0.010328$ و $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$ و $d_3=0.001308$.

میانگین مقادیر SPEI برابر صفر و انحراف معیار آن‌ها برابر ۱ می‌باشد. SPEI یک متغیر استاندارد شده می‌باشد که می‌توان مقادیر آن را با دیگر مقادیر SPEI در زمان و مکان‌های دیگر مقایسه نمود. مقدار SPEI صفر نشان دهنده مقدار متناظر با مقدار 50% درصد در تابع توزیع تجمعی مقادیر D بر اساس تابع توزیع احتمال لوگ-لوجستیک می‌باشد (۳۳).

در توسعه شاخص‌های RDI و SPEI از مفاهیم شاخص SPI استفاده گردیده‌است. بنا بر این مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی در آن‌ها مشابه با طبقه‌های ارائه شده توسط ادوارد و مک کی (۹) برای شاخص SPI می‌باشد که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. طبق این روش دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به طور مستمر منفی و به مقدار -1 یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد. در این تحقیق برای محاسبه شاخص SPEI از بسته آماری spei و برای محاسبه شاخص‌های SPI از بسته آماری spi در نرم‌افزار R استفاده شده است.

برآورد تبخیر و تعرق

برای محاسبه مقادیر شاخص‌های RDI و SPEI علاوه بر مقادیر بارش نیاز به مقادیر تبخیر و تعرق می‌باشد. مقدار تبخیر و تعرق در شاخص‌ها مذکور با استفاده از داده‌های دمای میانگین و از روش تورنت- وایت محاسبه می‌شود.

با توجه به آن که این روش در مناطق مرطوب مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار واقعی و در مناطق خشک کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند (۲۲)، در این تحقیق دو روش دمائی هارگریوز-سامانی (HS) و $FPM_{RSRHest}$ (روش فائو پنمن ماتنیت با برآورد رطوبت نسبی و تابش خورشیدی از معادلات دمائی) در دوره‌ی $2010-2010$

تولیدات کشاورزی نقش مهمی دارد) و اثرات دوره‌های طولانی مدت منابع آب را پایش نماید (۱۹).

ساکریس و همکاران (۳۲) با بیان این که خشکسالی‌های منطقه مدیترانه با افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق همراه هستند و شاخص‌های مبتنی بر بارش به تنهایی نمی‌تواند بیانگر خصوصیات خشکسالی در این مناطق باشند، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) را بر پایه‌ی مفاهیم شاخص SPI و نسبت بارش به تبخیر و تعرق برای پایش خشکسالی و در نظر گرفتن نوسانات اقلیمی پیشنهاد دادند. فرض اولیه در شاخص RDI آن است که مقادیر نسبت بارش به تبخیر و تعرق در بازه‌های زمانی دلخواه از تابع توزیع لوگ-نرمال پیروی می‌کند اما نتایج برخی از تحقیقات (۳۰ و ۳۱) بیانگر آن است که تابع توزیع گاما می‌تواند در برخی از مناطق برازش بهتری بر این نسبت داشته باشد.

ویسنت‌سرانو و همکاران (۳۳) شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEPI) را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پیشنهاد دادند. این شاخص با ترکیب حساسیت شاخص PDSI از طریق تغییرات تقاضای تبخیر و بر پایه‌ی مفاهیم قابلیت محاسبه در مقیاس‌های مختلف شاخص SPI توسعه یافته است. برای محاسبه شاخص SEPI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای ماه i از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (۱)$$

محاسبه این شاخص همانند روش ارائه شده برای محاسبه‌ی شاخص SPI نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i از طریق برازش یک تابع چگالی احتمال می‌باشد. با توجه به آن که مقادیر D_i از کران پائین به مقادیر منفی منتهی می‌شوند توابع احتمال دوپارامتری نمی‌تواند برای این امر انتخاب شوند. ویسنت‌سرانو و همکاران (۳۳) با بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ-لوجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر D_i تشخیص دادند. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (۲)$$

که در آن پارامترهای α , β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D_i در دامنه‌ی $-\infty < D < \infty$ می‌باشند. فرم تابع احتمال تجمعی لوگ-لوجستیک سه پارامتری نیز مطابق رابطه ۳ است:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (۳)$$

۳ به ترتیب دوره‌های خشکسالی با بیشترین کمبود، طولانی‌ترین مدت و بیشترین شدت متوسط را نشان می‌دهند (۲۰).

مدل LARS-WG5

مدل ریزمقیاس LARS-WG5 توسط راسکو و همکاران (۲۳) و زمف و بارو (۲۶) در کشور مجارستان برای شبیه‌سازی مقادیر روزانه متغیرهای دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش خورشیدی ارائه گردید. این مدل مولد اقلیمی از سه بخش اصلی شامل: واسنجی، ارزیابی و شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده تشکیل شده است. نیاز اساسی مدل در مرحله واسنجی، فایلی است که مشخص کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته می‌باشد. این فایل با استفاده از داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش خورشیدی دوره پایه برای ایستگاه مورد بررسی تهیه شده و مدل بر اساس آن اجرا می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از آماره‌های خطاسنجی اقدام به صحت‌سنجی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهده شده) موجود در دوره پایه می‌گردد (۲). در این تحقیق به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده و واقعی در دوره پایه از آماره‌های خطاسنجی R^2 ، RMSE، MBE و MAE استفاده شده است. بر اساس شاخص‌های آماری مدلی که دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار آماره‌های خطاسنجی باشد به عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود.

پس از کنترل و تأیید قابلیت مدل در شبیه‌سازی رفتار متغیرهای اقلیمی در دوره پایه، شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی برای دوره‌های آینده صورت می‌پذیرد. در این فرآیند، مدل با استفاده از رفتار متغیرهای اقلیمی در دوره پایه و ریزمقیاس نمایی آماری داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، پارامترهای اقلیمی آینده را شبیه‌سازی می‌کند. بدین منظور، سناریوهایی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای بر مبنای شرایط اقتصادی - اجتماعی کشورها در سال‌های آتی تعریف می‌شود. در این تحقیق از سه سناریوی A1B، A2 و B1 استفاده شده است: سناریوی B1 با فرض جهانی متجانس که در آن ساختارهای اقتصادی به سرعت در جهت ارائه خدمات و اطلاعات تغییر پیدا می‌کند و استفاده از مواد خام کاهش و فناوری‌های پاک به سرعت توسعه می‌یابند، پی‌ریزی شده است. سناریوی A2 بر فرض جهانی نامتجانس پی‌ریزی و بر مبنای آن در آینده، جمعیت جهان افزایش، رشد اقتصادی کم و رشد فناوری‌های پاک کاهش می‌یابد. در سناریوی A1B در دهه‌های آینده، رشد اقتصادی سریع، رشد جمعیت کم و رشد فناوری‌های نوین به سرعت افزایش می‌یابد (۲۷).

۱۹۸۱ بر اساس معیارهای آماری با مرجع قرار دادن روش استاندارد فائو پنمن مانیتث (FPM) ارزیابی و بهترین روش برای برآورد تبخیر و تعرق در دوره‌های آتی و پایه انتخاب گردید.

جدول ۱- طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPEI و RDI، SPI

Table 1- Different classes of drought intensity based on SPI, RDI and SPEI indices

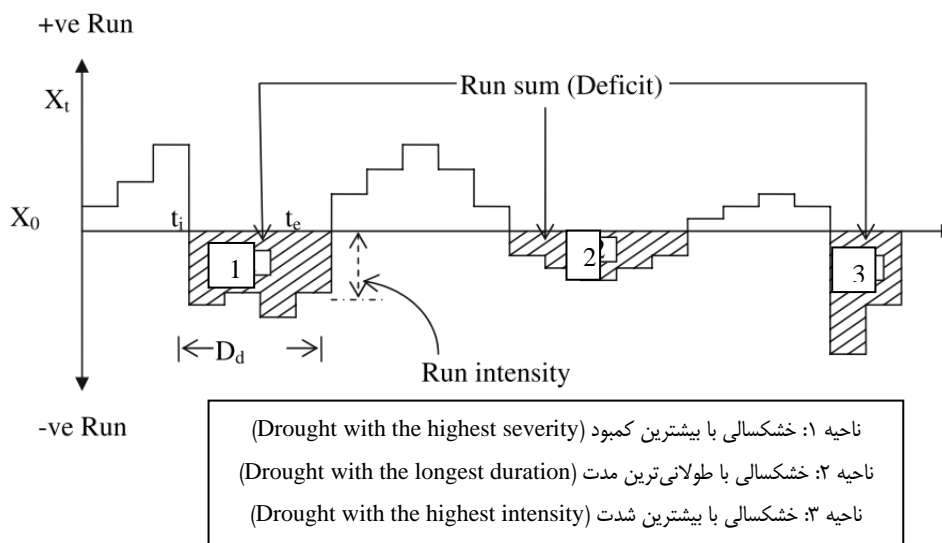
| طبقه خشکسالی Drought classes | مقدار عددی شاخص Index value |
|------------------------------------|--------------------------------|
| ترسالی بسیار شدید Extreme wet | $Index \geq 2.0$ |
| ترسالی شدید Severe wet | $1.5 \leq Index < 2.0$ |
| ترسالی متوسط Moderate wet | $1.0 \leq Index < 1.5$ |
| نرمال Normal | $-0.99 \leq Index \leq 0.99$ |
| خشکسالی متوسط Moderate drought | $-1.5 < Index \leq 1.0$ |
| خشکسالی شدید Severe drought | $-2.0 < Index \leq -1.5$ |
| خشکسالی بسیار شدید Extreme drought | $Index \leq -2.0$ |

در این راستا در دوره پایه تمامی ماه‌هایی که در آن‌ها پارامترهای مورد نیاز روش FPM به طور کامل موجود بودند تعیین و مقادیر تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های FPM، HS و $FPM_{RSRHest}$ برآورد شدند. سپس با استفاده از آماره‌های سنجش خطا شامل ضریب تبیین (R^2) ، میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ ، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین خطای مطلق (MAE) (۲) معادلات مذکور ارزیابی و بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق برای دوره‌های آتی و پایه تعیین گردید.

تحلیل ویژگی‌های خشکسالی با استفاده از تئوری ران

یکی از روش‌های متداول تحلیل خشکسالی، تئوری ران^۵ می‌باشد. با استفاده از این تئوری سه ویژگی مهم خشکسالی (تداوم، شدت و سختی) را می‌توان تعریف نمود که در شکل ۱ این مشخصات با در نظر گرفتن سطح آستانه X_0 برای متغیر اصلی X_t نشان داده شده‌اند. بر اساس این روش، طول دوره خشکسالی برابر فاصله زمانی است که در طی آن، مقدار متغیر اصلی از سطح بحرانی کمتر است (ناحیه‌های هاشور خورده). مجموع کمبودها برابر با مجموع کمبودهای متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر در دوره وقوع خشکسالی می‌باشد. نسبت مجموع کمبودها به طول دوره خشکسالی برابر میانگین کمبودها می‌باشد. در شکل ۱ ناحیه‌های هاشور خورده ۱، ۲ و

- 1- Coefficient of Determination
- 2- Root Mean of Square Error
- 3- Mean of Bias Error
- 4- Mean of Absolute Error
- 5- Run Theory



شکل ۱- توصیف خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری ران با در نظر گرفتن سطح آستانه X_0
 Figure 1- Description of drought characterization by using run theory with truncation level of X_0

اجرای گروهی مدل‌های تغییر اقلیم به منظور کاستن از عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های اقلیمی را فراهم می‌سازد. در فرآیند اجرای گروهی تعداد مدل‌های انتخابی بر حسب نوع کار از ۳ تا ۱۵ مدل متفاوت می‌باشد.

در این تحقیق با بررسی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو موجود در مدل LARS-WG5 (۲۷)، از میان آن‌ها ۵ مدل GCMs شامل: IPCC AR4, MPEH5, HADCM3, GFCM21 و NCCCS که هر سه سناریوی انتشار A1B, A2 و B1 را دارا بودند برای بررسی تغییرات اقلیمی بر مبنای فرآیند اجرای گروهی مدل‌ها انتخاب شدند. مشخصات مدل‌های انتخاب شده در جدول ۲ آورده شده است. روش‌های مختلفی برای اجرای فرآیند گروهی وجود دارد که عمده‌ترین آن‌ها شامل میانگین حسابی، میانگین وزنی و رگرسیون چندگانه می‌باشند. مبنای روش‌های میانگین وزنی و رگرسیون چندگانه براساس مقایسه داده‌های واقعی با داده‌های تولید شده مدل GCM در همین دوره است که بر این مبنا عملیات وزن‌دهی یا ایجاد همبستگی بین این داده‌ها انجام می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج مدل LARS-WG در شبیه‌سازی اقلیم فعلی

نتایج ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی در دوره پایه توسط مدل LARS-WG بر مبنای آماره‌های خطاسنجی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین نمودار میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای متغیرهای اقلیمی دمای حداقل و حداکثر و بارش ماهانه در شکل ۲ (a تا c) نشان داده شده‌اند.

خروجی مدل‌های GCMs شامل تغییرات ماهانه‌ی مقادیر دما و بارش بر اساس سناریوهای انتشار می‌باشند. روش‌های ریزمقیاس‌نمائی به منظور بازسازی خلا آماری بین داده‌های ماهانه و تغییرات مقیاس روزانه متغیرها استفاده می‌شوند. روش‌های دینامیکی، آماری و تناسبی مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت ریزمقیاس‌نمائی داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی و افزایش قدرت تفکیک مکانی آن‌ها می‌باشد که هر یک از این روش‌ها دارای توانایی‌ها و ضعف‌هایی هستند. برتری اصلی روش‌های آماری، ساده‌بودن فرآیند ریزمقیاس‌نمائی و نیاز به پارامترهای کمتر است که باعث شده بیش از روش‌های دینامیکی به خاطر پیچیدگی محاسبات و زمان‌بر بودن (۲۷) مورد استفاده قرار گیرد. در روش‌های آماری، ریزمقیاس‌نمائی با استفاده از سوابق آماری در ایستگاه‌های مورد بررسی صورت می‌گیرد. در مدل LARS-WG5 برای برآورد توزیع فراوانی دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشیدی از توزیع نیمه‌تجربی (تابع توزیع احتمال تجمعی) استفاده می‌شود که بر پایه‌ی داده‌های ماهانه می‌باشند. ابتدا همبستگی آماری بین خروجی مدل در گذشته با داده‌های دوره آماری ایستگاه هواشناسی بدست می‌آید. در صورت نبود اختلاف معنی‌دار، مدل با استفاده از رفتار متغیرهای اقلیمی در دوره‌ی پایه و ریزمقیاس‌نمائی آماری داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، پارامترهای اقلیمی آینده را در حد مقیاس منطقه مورد مطالعه (ایستگاه هواشناسی) شبیه‌سازی می‌کند (۲۷).

بنا به جدیدترین توصیه‌ی IPCC، در شبیه‌سازی‌های اقلیمی استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها می‌تواند بر کاهش عدم قطعیت‌ها در مدل موثر باشد. نسخه‌ی ۵ مدل LARS-WG، با تجمیع ۱۵ مدل گردش عمومی جو در IPCC AR4، امکان

جدول ۲- مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو IPCC AR4 در مدل LARS-WG (۲۷)

Table 2- Features of general climate model in the IPCC Fourth Assessment Report in LARS-WG model (27)

| مرکز تحقیقاتی Research centre | کشور Country | مدل گردش عمومی Global climate model | نام اختصاری Model acronym | قدرت تفکیک Grid resolution | سناریوهای اقلیمی Emissions scenarios |
|--|------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|--|
| پژوهشکده پیرسیمون لاپلاس Pierre Simon Laplace Institute | فرانسه France | IPSL-CM4 | IPCM4 | 2.5×3.75° | A1B, A2, B1 |
| پژوهشکده ماکس پلانک در هواشناسی Max-Planck Institute for Meteorology | آلمان Germany | ECHAM5-OM | MPEH5 | 1.9×1.9° | A1B, A2, B1 |
| مرکز هواشناسی انگلیس UK Meteorological Office | انگلیس UK | HadCM3 | HADCM3 | 2.5×3.75° | A1B, A2, B1 |
| آزمایشگاه ژئوفیزیک دینامیک سیالات Geophysical Fluid Dynamics Lab | آمریکا USA | GFDL-CM2.1 | GFCM21 | 2×2.5° | A1B, A2, B1 |
| مرکز ملی پژوهش‌های جو National Centre for Atmospheric Research | آمریکا USA | CCSM3 | NCCCS | 1.4×1.4° | A1B, A2, B1 |

نسبتاً پائین هستند که همگی بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی رفتار اقلیمی متغیرهای مورد بررسی در دوره پایه می‌باشد. بنابراین، با تأیید توانایی مدل LARS-WG5 در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک همدان (فرودگاه) در دوره پایه امکان استفاده از آن برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی دوره‌های آینده وجود دارد.

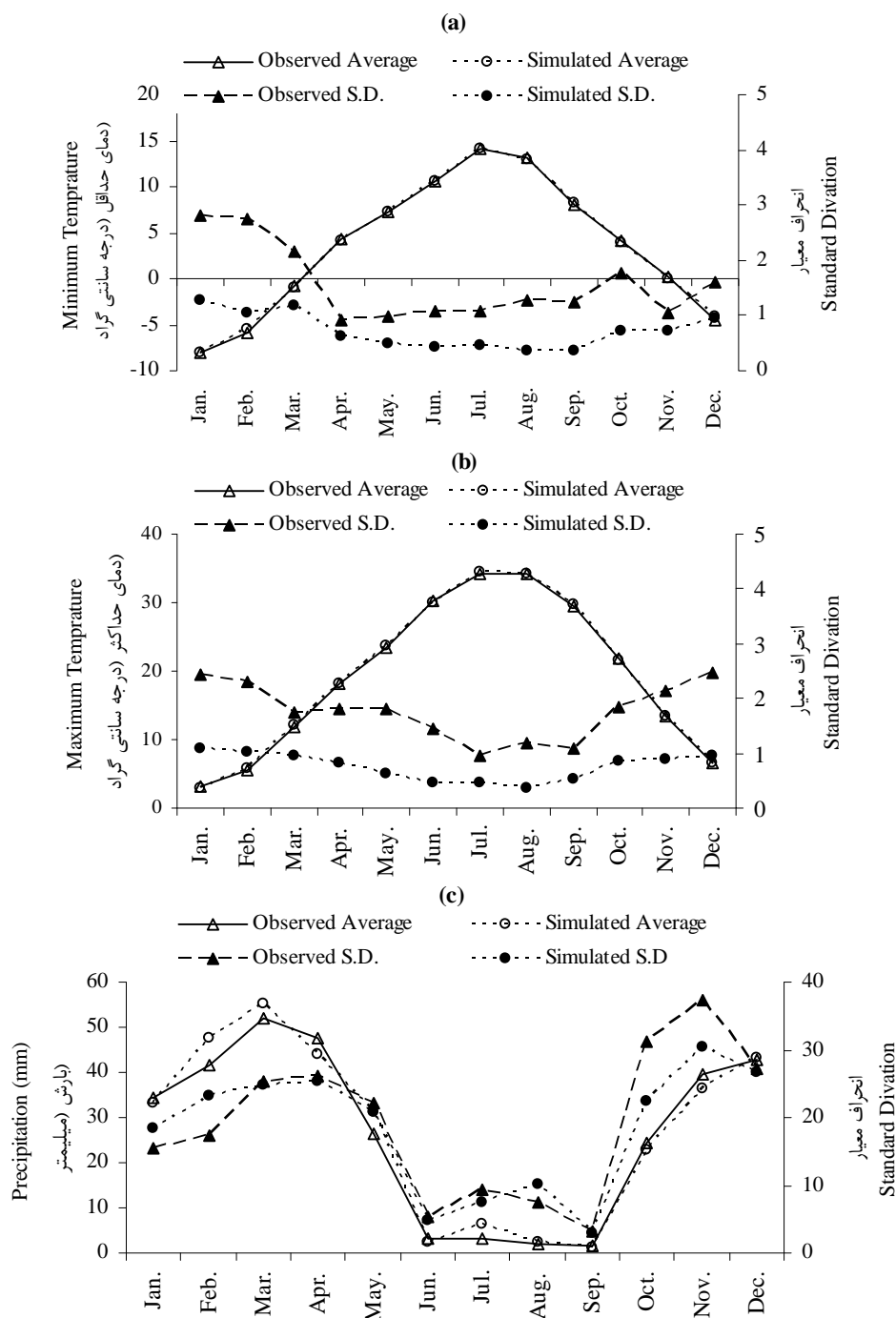
با تأیید توانایی مدل LARS-WG5 برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره پایه، مدل مذکور برای شبیه‌سازی مقادیر روزانه داده‌های اقلیمی دمای حداقل و حداکثر و بارش در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ با استفاده از داده‌های ۵ مدل GCMs شامل: IPCLM4، MPEH5، HADCM3، GFCM21 و NCCCS بر مبنای هر یک از سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 اجرا گردید. همان طور که آورده شد برای اجرای گروهی مدل‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق با میانگین‌گیری از نتایج شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش از مدل‌های مختلف به روش میانگین حسابی، مقادیر روزانه پارامترهای دمای حداقل، حداکثر و بارش در سه دهه‌ی آتی شبیه‌سازی گردیدند.

بر اساس نتایج، مقادیر میانگین دمای حداقل و حداکثر شبیه‌سازی شده تطابق نسبتاً بالایی با مقادیر مشاهداتی در دوره پایه دارند هرچند این تطابق برای مقادیر انحراف معیار در برخی از ماه‌ها کمتر می‌باشد (شکل ۲- a و b). بر اساس نتایج برخی از تحقیقات قبلی، مدل LARS-WG در شبیه‌سازی مقادیر میانگین نسبت به انحراف معیار دقت بیشتری دارد در حالی که مدل مولد اقلیمی SDSM در شبیه‌سازی مقادیر انحراف معیار نسبت به میانگین دقت بالاتری دارد. مقدار R^2 برای متغیرهای دمای حداقل و حداکثر برابر ۰/۹۹۹ و مقدار RMSE به ترتیب برابر ۰/۱۷۳ و ۰/۲۴۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمد که نشانگر دقت بالای مدل برای شبیه‌سازی مقادیر دوره پایه می‌باشد. با وجود آن که بارش از تغییرپذیرترین متغیرهای اقلیمی می‌باشد اما بررسی مقادیر میانگین بارش شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارند (شکل ۲- c) به طوری که مقدار R^2 برابر ۰/۹۸۷ به دست آمد. بررسی نتایج آماره‌های ارزیابی نشان می‌دهد مقدار آماره R^2 برای شبیه‌سازی متغیرهای مورد بررسی از مقدار بالایی برخوردار است و مقادیر سایر آماره‌های خطاسنجی نیز

جدول ۳- ارزیابی مدل LARS-WG5 در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) با استفاده از آماره‌های خطاسنجی

Table 3- Evaluation of LARS-WG5 model for base period (1981-2010) by using Statistical error Indices

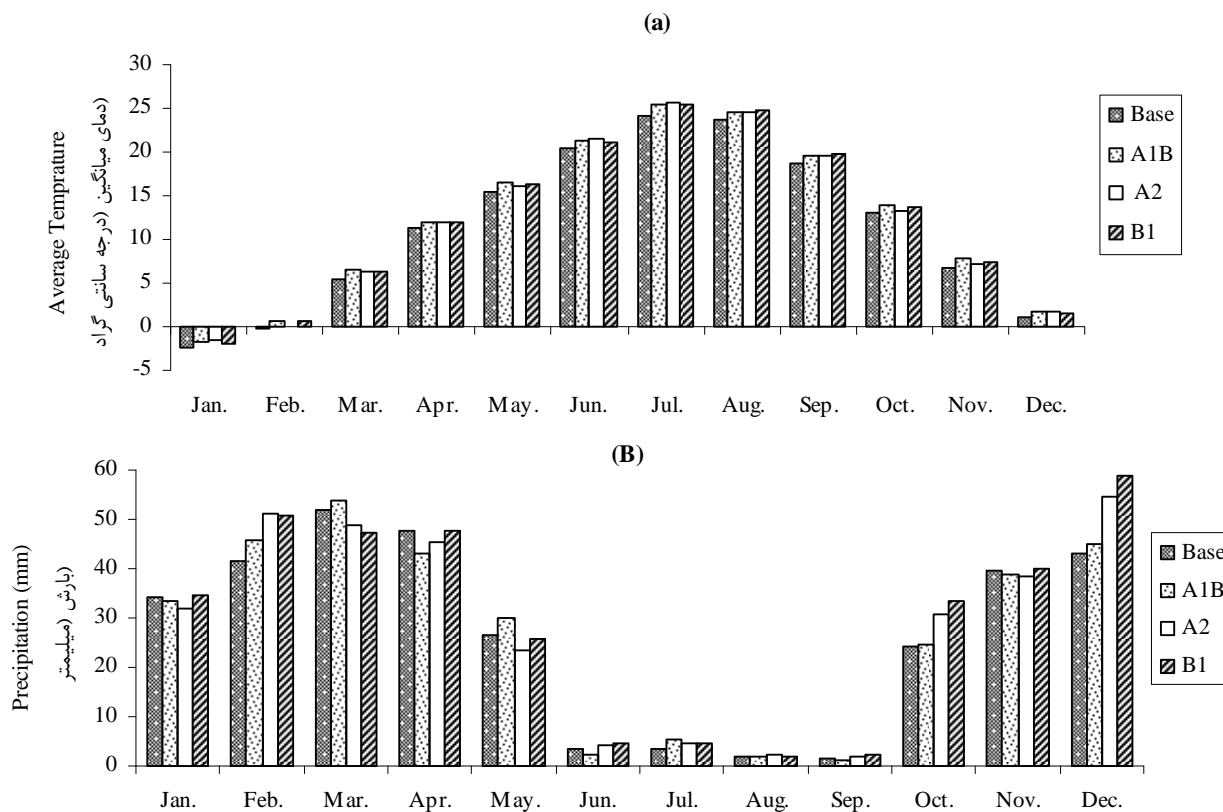
| پارامتر Variable | آماره‌های خطا Statistic error | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------|--------|-------|
| | R^2 | RMSE | MBE | MAE |
| دمای حداقل Minimum temperature | 0.999 | 0.173 | -0.001 | 0.146 |
| دمای حداکثر Minimum temperature | 0.999 | 0.243 | -0.027 | 0.217 |
| بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm) | 0.987 | 2.245 | 0.641 | 1.433 |



شکل ۲- میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای حداقل ماهانه (a)، دمای حداکثر ماهانه (b) و بارش ماهانه (c)
 Figure 2- The values of average and standard deviation of observed and simulated value for monthly minimum temperature (a), monthly maximum temperature (b) and monthly precipitation (c)

سه سناریو طی دهه‌های آتی در مقایسه با دوره پایه برای تمام ماه‌ها دارای افزایش می‌باشد به طوری که میانگین این افزایش برای سناریوهای A1B، A2 و B1 به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۰/۸۲ و ۰/۸۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

در ادامه میانگین ماهانه‌ی دمای میانگین و بارش برای دوره مذکور محاسبه و به صورت مقایسه‌ای نسبت به دوره پایه بر مبنای سه سناریوی مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج شکل ۳ (a) مقدار دمای میانگین شبیه‌سازی شده بر اساس هر



شکل ۳- میانگین ماهانه متوسط دما (a) و بارش (b) در دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۴۰ بر اساس اجرای گروهی مدل‌ها و سناریوهای انتشار در مقایسه با دوره پایه

Figure 3- Average of monthly mean temperature (a) and precipitation (b) for 2011-2040 period based on performance of multi-model ensembles and emissions scenarios in comparison with base period

مقیاس زمانی محاسبه و مقادیر متناظر با احتمال‌های مذکور به ازای بارندگی‌های مختلف در تابع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک تعیین شدند. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مقادیر SPI می‌باشند.

نتایج ارزیابی معادلات برآورد تبخیر و تعرق در دوره پایه در جدول ۴ آورده شده است. بر اساس نتایج این جدول، روش $FPM_{RSRHest}$ با ضریب تبیین ۰/۹۴۴ و RMSE برابر با ۰/۶۵۸ به عنوان بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق در ایستگاه همدان انتخاب و مقادیر PET برای استفاده در شاخص‌های RDI و SPEI در دوره پایه و دوره‌های آتی از این روش محاسبه گردید.

با محاسبه‌ی مقادیر تبخیر و تعرق در دوره‌ی پایه و سه دهه‌ی آتی، جهت محاسبه‌ی شاخص RDI با فرض آن که نسبت بارش به تبخیر و تعرق از تابع توزیع گامای دو پارامتری پیروی می‌کند تابع احتمال تجمعی این نسبت برای مقیاس‌های مختلف زمانی محاسبه و با تبدیل آن‌ها به مقادیر نرمال استاندارد شده مقادیر شاخص RDI تعیین گردید.

برای محاسبه شاخص SPEI، مقادیر D_i مطابق رابطه ۱ تعیین و

بر پایه‌ی نتایج شکل ۳ (B) مقدار بارش در ماه‌های فوریه، آوریل، ژوئیه، سپتامبر و اکتبر به طور مشخصی در دهه‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه افزایش می‌یابد و طی ماه‌های ژانویه، مارس، مه، ژوئن، اوت و نوامبر روند کاهشی را نشان می‌دهد. بررسی بارش‌های بهاره (مارس، آوریل و مه) در دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۱) روند کاهشی را نشان می‌دهند. به طور کلی میانگین بارش سالانه در سه دهه آتی نسبت به وضعیت فعلی وضعیت افزایشی نسبتاً کمی را نشان می‌دهد به طوری که میزان این افزایش نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوی محتمل A2 برابر ۲/۵ درصد می‌باشد.

نتایج محاسبه شاخص‌های خشکسالی و بررسی ارتباط

بین آن‌ها

برای محاسبه شاخص SPI از مقادیر بارش ماهانه در دوره پایه و مقادیر شبیه‌سازی شده در دوره‌ی ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از بسته آماری spi در نرم‌افزار R با برازش تابع چگالی احتمال گامای دوپارامتری، احتمال تجمعی مقادیر بارش در هر

مقدار همبستگی بین شاخص‌های RDI و SPEI مشاهده شد به طوری که بیشتر همبستگی‌های به‌دست آمده به جز در سناریوی B1 مقادیری کمتر از ۰/۹۰ دارند. همچنین بر پایه نتایج هر سه سناریو در مقیاس‌های زمانی میان‌مدت و بلندمدت بیشترین مقدار همبستگی بین شاخص‌های SPI و SPEI وجود دارد که در مقیاس‌های کوتاه مدت ۱ و ۳ ماهه بیشترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های RDI و SPI مشاهده می‌شود. از طرف دیگر در دوره پایه با افزایش طول مقیاس مقدار ضریب همبستگی به‌دست آمده کمتر شده است. با توجه به سوابق تحقیق بررسی شده و این که شاخص‌های مبتنی بر بارندگی نظیر SPI نمی‌توانند اثر افزایش دما را برای نوسانات اقلیمی در نظر بگیرند و از طرفی با توجه به افزایش مقدار میانگین متوسط دما به مقدار ۰/۸۳ و ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد در سناریوهای A1B و A2 نسبت به دوره پایه (شکل ۳-ا) در ادامه این تحقیق از شاخص SPEI به عنوان یک شاخص مناسب برای شناسائی، پایش و بررسی پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی در شرایط خشکسالی در ایستگاه سینوپتیک همدان استفاده شده است.

نتایج پایش وضعیت رطوبتی در دوره پایه و دهه‌های آتی

بارش از عوامل مهم جوی است و پدیده خشکسالی با کمبود بارندگی آغاز و بسته به طول مدت و شدت آن می‌تواند سایر اجزا چرخه‌ی هیدرولوژی را به مرور زمان تحت تأثیر قرار دهد. کمبود بارش در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت بر رطوبت خاک و در مقیاس بلندمدت بر آب‌های زیرزمینی، دبی رودخانه‌ها و منابع آب اثر می‌گذارد.

با برآزش تابع چگالی احتمال لوگ- لوجستیک سه پارامتری بر مقادیر D_i مقادیر احتمال تجمعی آن‌ها محاسبه شد. سپس به شیوه معکوس مقدار متناظر با احتمال تجمعی مذکور در توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک تعیین گردید که بیانگر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند.

جدول ۴- نتایج ارزیابی معادلات مختلف برآورد تبخیر و تعرق در دوره‌ی پایه با مرجع قرار دادن روش استاندارد فانو پنمن - مانتیث
Table 4- The results of evaluation of different ET_o estimation equations in base period by using FAO Penman Monteith as a reference method

| معادلات equations | آماره‌های ارزیابی خطا Performance statistic error | | | |
|--|--|-------|--------|-------|
| | R ² | RMSE | MBE | MAE |
| HS | 0.935 | 1.183 | -0.828 | 0.841 |
| FPM _{R_sR_{Hest}} | 0.944 | 0.658 | -0.392 | 0.458 |

در ادامه مقادیر شاخص‌های SPEI، SPI و RDI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ ماهه و سالانه در دوره پایه و سه دهه آتی محاسبه گردید سپس ضریب همبستگی شاخص‌های مورد استفاده با یکدیگر در مقیاس‌های زمانی مورد بررسی در دوره‌های پایه و ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ تعیین شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. مقادیر ضریب همبستگی به‌دست آمده برای شاخص‌های مختلف در دهه‌های آتی و دوره پایه بسیار به هم نزدیک می‌باشند، به طوری که برای شاخص‌های RDI و SPI در دهه‌های آتی تقریباً برابر با یک به‌دست آمدند. بررسی نتایج در سایر مقیاس‌ها نیز نشان داد ضریب همبستگی بین شاخص‌های مختلف با یکدیگر در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه بیشتر می‌باشد و در هر سناریو کمترین

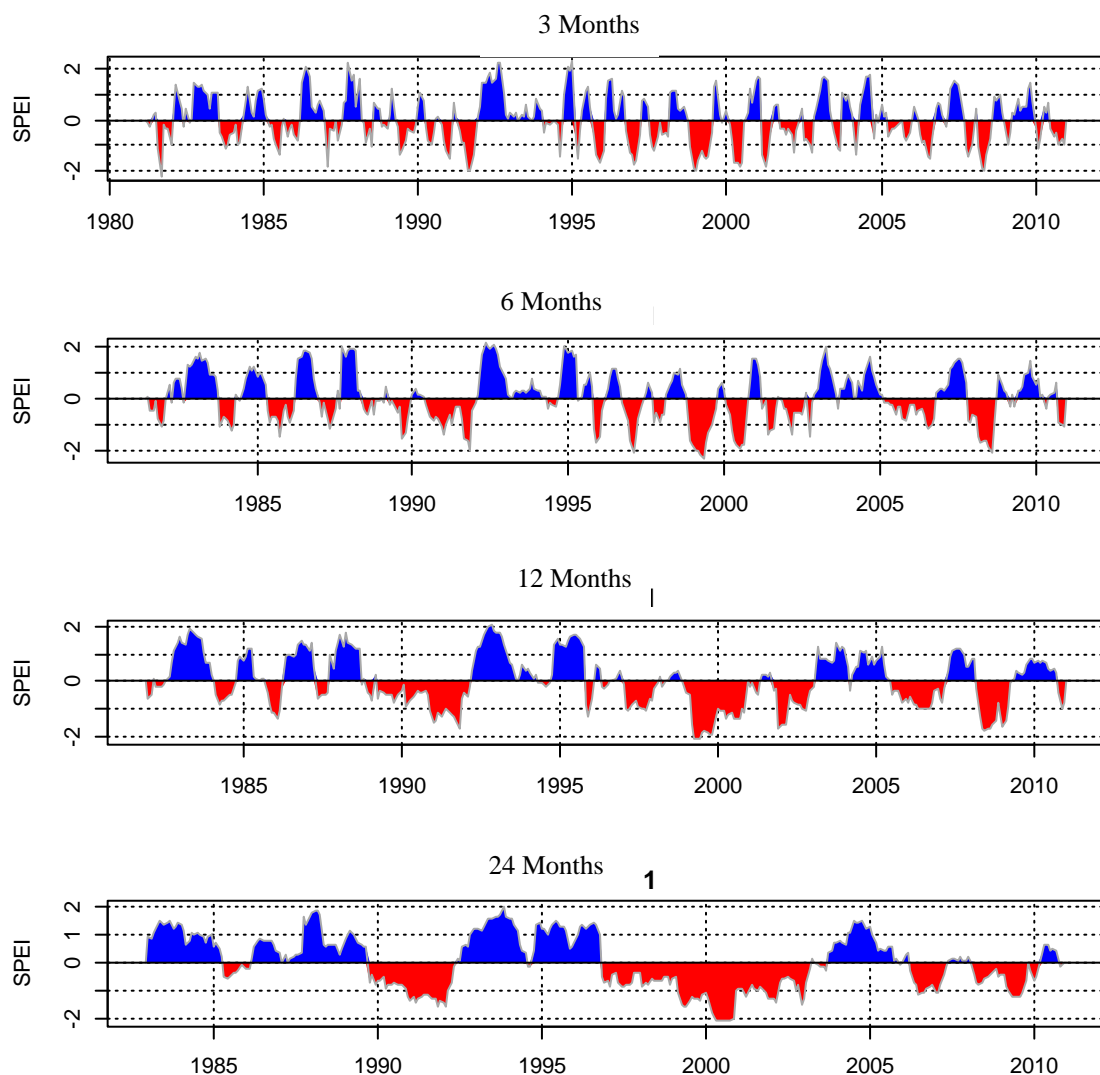
جدول ۵- نتایج ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPEI، SPI و RDI با یکدیگر در مقیاس‌های مختلف زمانی در دوره پایه و دوره‌های آتی

Table 5- Values of correlations between SPEI, SPI and RDI indices under different time scales in base and future periods

| دوره Period | سناریو scenario | شاخص‌ها indices | مقیاس‌های مختلف زمانی Different time scales | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| | | | 1 months | 3 months | 6 months | 12 months | 18 months | 24 months | سالانه Annual |
| دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) | - | SPEI & SPI | 0.851 | 0.934 | 0.960 | 0.957 | 0.942 | 0.930 | 0.948 |
| | | SPEI & RDI | 0.865 | 0.925 | 0.888 | 0.800 | 0.780 | 0.767 | 0.978 |
| Bsaе period (1981-2010) | A1B | SPI & RDI | 0.985 | 0.959 | 0.886 | 0.797 | 0.770 | 0.757 | 0.992 |
| | | SPEI & SPI | 0.888 | 0.967 | 0.983 | 0.980 | 0.978 | 0.967 | 0.980 |
| دوره‌های آتی (۲۰۱۱-۲۰۴۰) Future periods (2011-2040) | A2 | SPEI & RDI | 0.894 | 0.941 | 0.902 | 0.882 | 0.888 | 0.889 | 0.982 |
| | | SPI & RDI | 0.996 | 0.969 | 0.925 | 0.910 | 0.924 | 0.934 | 1.000 |
| | B1 | SPEI & SPI | 0.894 | 0.963 | 0.979 | 0.971 | 0.967 | 0.956 | 0.978 |
| | | SPEI & RDI | 0.901 | 0.939 | 0.892 | 0.851 | 0.851 | 0.845 | 0.980 |
| | B1 | SPI & RDI | 0.996 | 0.969 | 0.918 | 0.892 | 0.905 | 0.914 | 1.000 |
| | | SPEI & SPI | 0.894 | 0.960 | 0.985 | 0.984 | 0.981 | 0.970 | 0.980 |
| B1 | SPEI & RDI | 0.900 | 0.937 | 0.920 | 0.918 | 0.926 | 0.924 | 0.983 | |
| | SPI & RDI | 0.997 | 0.972 | 0.938 | 0.935 | 0.946 | 0.953 | 1.000 | |

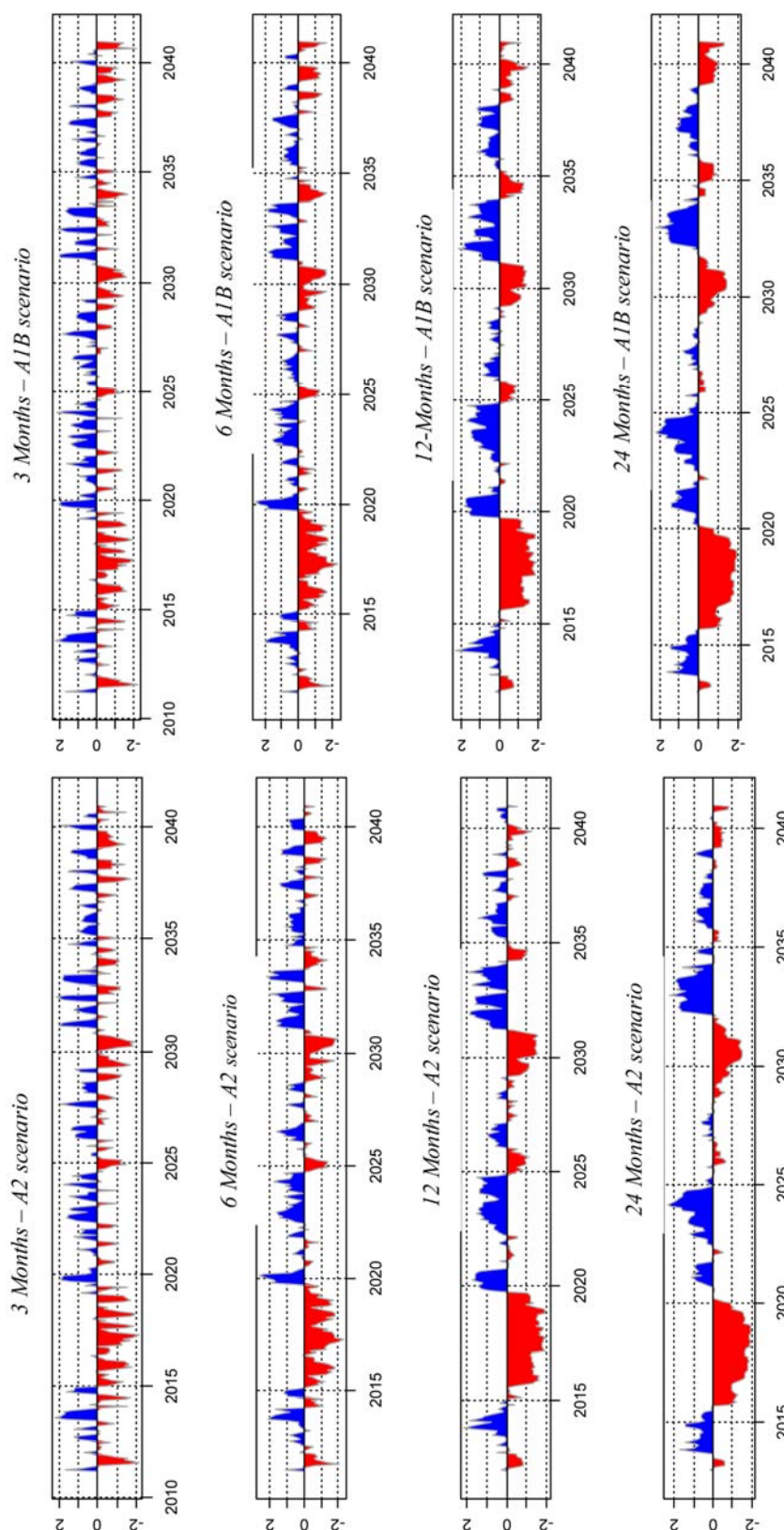
ماهه معادل ۲۲ ماه (آوریل ۱۹۹۹ تا ژانویه ۲۰۰۱) می‌باشد. نتایج دوره‌های خشکسالی طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ در تطابق با وضعیت‌های گزارش شده می‌باشد به طوری که بر اساس گزارش FAO (۱۰)، طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ یک خشکسالی بلندمدت و شدید بر نقاط مختلف کشور سیطره یافت و بیش از نیمی از جمعیت کشور را با بحران آب و غذا روبرو کرد و موجب افت شدید آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش تولیدات کشاورزی گردید.

از این‌رو در ادامه، نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص SPEI برای مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (۳ و ۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲ و ۲۴ ماهه) در دوره‌ی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه دوره‌های خشکسالی و ترسالی به تناوب تکرار شده‌اند و شدیدترین خشکسالی در مقیاس ۶ ماهه از انتهای سال ۱۹۹۸ میلادی تا ابتدای اکتبر ۱۹۹۹ رخ داده است. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه شدیدترین رخداد‌های خشکسالی طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ اتفاق افتاده‌اند به طوری که طول دوره‌ی خشکسالی در مقیاس ۲۴



شکل ۴- وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در دوره پایه (۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰)

Figure 4- Drought monitoring based on SPEI index in different time scales of base period (1981-2010)



شکل ۵- وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SPEI و سناریوهای انتشار A2 و A1B در مقیاس‌های زمانی مختلف در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰
 Figure 5- Drought monitoring based on SPEI index and emissions scenarios of A1B and A2 under different times scales in period of 2011-2040

رطوبتی در محدوده‌های نزدیک به شرایط رطوبتی نرمال می‌باشد. بررسی وضعیت رطوبتی آینده طی سه دهه پیش‌بینی نشان می‌دهد تغییرات رطوبتی (دوره‌های خشک و مرطوب) از نظر طول دوره، مجموع کمبود یا مازاد و شدت خشکسالی در دهه اول پیش‌بینی نسبت به دهه‌های اول و سوم پیش‌بینی دارای تغییرات بیشتری می‌باشد که می‌تواند از جنبه مدیریتی بیشتر حائز اهمیت باشد.

نتایج استخراج ویژگی‌های رطوبتی بر اساس تئوری ران

در ادامه با استفاده از تئوری ران با در نظر گرفتن محدوده نرمال (۰/۹۹- تا ۰/۹۹) به‌عنوان شرایط آستانه برای تعیین دوره‌های مرطوب و خشک، ویژگی‌های وضعیت‌های رطوبتی نظیر: تعداد دوره، مدت زمان طولانی‌ترین دوره، مجموع کمبودها و مازادها و بیشترین مقدار کمبود یا مازاد برای دو دوره خشک و مرطوب استخراج شده‌اند که نتایج آن برای دوره‌های پایه و ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده‌اند.

سناریوی A2 با رشد افزایشی جمعیت جهان و رشد اقتصادی نامتوازن همراه می‌باشد، سناریوی A1B نیز مبین رشد سریع اقتصادی و رشد جمعیتی سریع در ابتدا و سپس کاهش می‌باشد از این رو به نظر می‌رسد این دو سناریو در تناسب بیشتری با وضعیت واقعی نسبت به سناریوی B1 در جوامع در حال توسعه در دهه‌های آینده باشد. از این رو در ادامه سیمای کلی وضعیت رطوبتی ایستگاه سینوپتیک همدان بر اساس نتایج سناریوهای A1B و A2 در مدل LARS-WG5 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ برای مقیاس‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج آن در دوره‌های کوتاه‌مدت وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی همانند دوره پایه به تناوب تکرار می‌گردند. بررسی وضعیت‌های رطوبتی در مقیاس‌های بلندمدت در هردو سناریو نشان می‌دهد دهه‌های اول و دوم پیش‌بینی نسبت به دهه سوم دارای وضعیت‌های خشکسالی‌های شدیدتری می‌باشند به طوری که در نیمه‌ی انتهایی دهه اول وضعیت‌های خشکسالی با شدت بیشتر محتمل‌تر می‌نمایند و وضعیت‌های ترسالی در نیمه‌ی دوم با شدت کمتری از نظر وقوع محتمل می‌نمایند. بررسی دهه سوم در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه بیانگر تغییرات وضعیت

جدول ۶- ویژگی‌های وضعیت رطوبتی طی دوره‌های خشک و مرطوب در دوره پایه (۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰)

Table 6- Characteristics of wet and dry periods in base period (1981-2010)

| مقیاس زمانی Time scale | دوره‌ی خشک Dry period | | | | دوره‌ی مرطوب Wet period | | | |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | تعداد دوره Number of periods | طولانی‌ترین دوره Longest period | بیشترین کمبود Maximum deficit | مجموع کمبودها Total deficit | تعداد دوره Number of periods | طولانی‌ترین دوره Longest period | بیشترین مازاد Maximum surplus | مجموع مازادها Total surplus |
| 1 months | 41 | جولای تا سپتامبر ۱۹۸۱ (۳ ماه) | 3.7 | 45.7 | 46 | سپتامبر تا نوامبر ۱۹۹۴ (۳ ماه) | 3.1 | 46.9 |
| 3 months | 26 | نوامبر ۱۹۹۸ تا ژوئن ۱۹۹۹ (۸ ماه) | 11.0 | 57.4 | 25 | فوریه تا اکتبر ۱۹۹۰ (۹ ماه) | 13.9 | 69.1 |
| 6 months | 19 | دسامبر ۱۹۹۸ تا اگوست ۱۹۹۹ (۹ ماه) | 14.8 | 59.4 | 13 | نوامبر ۱۹۸۲ تا ژوئن ۱۹۸۳ (۹ ماه) | 13.0 | 73.6 |
| 12 months | 13 | مارس ۱۹۹۹ تا نوامبر ۲۰۰۰ (۲۱ ماه) | 30.4 | 67.2 | 11 | می ۱۹۹۲ تا آپریل ۱۹۹۳ (۱۲ ماه) | 18.4 | 83.2 |
| 18 months | 12 | مارس ۱۹۹۹ تا اکتبر ۲۰۰۰ (۲۰ ماه) | 32.0 | 77.7 | 15 | سپتامبر ۱۹۹۲ تا نوامبر ۱۹۹۳ (۱۶ ماه) | 24.2 | 75.2 |
| 24 months | 9 | آپریل ۱۹۹۹ تا ژانویه ۲۰۰۱ (۲۲ ماه) | 34.1 | 70.5 | 9 | دسامبر ۱۹۹۳ تا آپریل ۱۹۹۴ (۱۷ ماه) | 23.5 | 83.9 |

وقوع پیوسته در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که نتایج تقریباً مشابهی بر پایه‌ی هردو سناریو قابل استنتاج است به گونه‌ای که در مقیاس‌های یکسان به ویژه در مقیاس‌های بلندمدت با کاهش تعداد دوره‌های خشک، مدت زمان طولانی‌ترین دوره نسبت به دوره‌ی پایه افزایش یافته است که می‌تواند بیانگر کاهش تعداد وقایع خشکسالی و دوام ماندگاری بیشتر آن‌ها باشد. به طوری که طولانی‌ترین دوره خشکسالی در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره پایه به ترتیب برابر با ۲۱ و ۲۲ ماه بدست آمد این در حالی است که مقادیر متناظر به‌دست آمده برای سه دهه آتی بر مبنای سناریوی A2 به ترتیب برابر با ۴۱ و ۳۷ ماه می‌باشد. بررسی مقادیر بیشترین کمبود در دوره‌های خشک طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نشان می‌دهد مقادیر بیشترین کمبود نسبت به دوره پایه در تطابق با نتایج طولانی‌ترین طول دوره می‌باشد به طوری که در مقیاس‌های متناظر به جز مقیاس‌های کوتاه مدت ۱ و ۳ ماهه دارای مقدار به مراتب بیشتری از دوره پایه می‌باشند که نشان دهنده دوره‌ی حادی با شدت بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر بررسی مجموع کمبودها طی دوره‌ی خشک نیز از روند بیان شده برای طول دوره و بیشترین حجم کمبود در تمام مقیاس‌ها پیروی می‌کند به عبارت دیگر برای مقیاس‌های ۱ و ۳ ماهه نسبت به دوره پایه افزایش نسبتاً کم و در مقیاس‌های بلندمدت ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج جدول ۶ برای دوره پایه، در مقیاس‌های کوتاه مدت ۱، ۳ و ۶ ماهه، دوره‌های خشکسالی و ترسالی به تناوب با شدت‌های مختلف به وقوع پیوستند و تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد (از ۳ به ۹ ماه). در مقیاس‌های بلندمدت ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه مدت زمان طولانی‌ترین دوره تقریباً معادل ۲۰ ماه می‌باشد که طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ به وقوع پیوستند و مجموع کمبودها برای مقیاس‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۶۷/۲، ۷۷/۷ و ۷۰/۵ بدست آمد. برای دوره‌ی مرطوب در مقیاس‌های بلندمدت تعداد دوره‌ها از ۹ تا ۱۱ ماه در نوسان می‌باشند به طوری که طولانی‌ترین دوره‌ها در محدوده سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۴ رخ داده‌اند. همچنین در دوره مرطوب مجموع مازادها نسبت به حد آستانه صفر در مقایسه با مجموع کمبودها به جز در مقیاس ۱۸ ماهه که تقریباً با هم برابر هستند دارای مقداری بیشتر می‌باشد.

بر اساس نتایج جدول ۷، طی سه دهه آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰) تعداد دوره‌های خشک بر اساس سناریوهای انتشار A1B و A2 در مقیاس‌های کوتاه مدت ۱ و ۳ ماهه افزایش و در مقیاس‌های بلندمدت دیگر کاهش می‌یابد به طوری که در مقیاس‌های ۱۸ و ۲۴ ماهه تعداد دوره‌های خشک بر اساس سناریوی A2 به ترتیب برابر با ۲ و ۵ ماه بدست آمدند در حالی که مقادیر متناظر برای دوره پایه به ترتیب برابر ۱۲ و ۹ می‌باشند. بررسی مدت زمان طولانی‌ترین دوره خشک به

جدول ۷- ویژگی‌های دوره‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص SPEI و سناریوهای انتشار A1B و A2 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰

Table 7- Characteristics of dry and wet periods based on SPEI index and emissions scenarios of A1B and A2 in 2011- 2040 period

| سناریو scenarios | مقیاس زمانی Time scales | دوره خشک Dry period | | | | دوره مرطوب Wet period | | | |
|---------------------|----------------------------|---------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | | تعداد دوره Number of periods | طولانی‌ترین دوره (ماه) Longest period | بیشترین کمبود Maximum deficit | مجموع کمبودها Total deficit | تعداد دوره Number of periods | طولانی‌ترین دوره Longest period | بیشترین مازاد Maximum surplus | مجموع مازادها Total surplus |
| A1B | 1 months | 51 | 3 | 2.4 | 45.8 | 45 | 3 | 3.0 | 49.5 |
| | 3 months | 28 | 7 | 9.1 | 62.6 | 27 | 6 | 8.9 | 66.0 |
| | 6 months | 17 | 12 | 17.6 | 75.7 | 21 | 7 | 12.3 | 65.4 |
| | 12 months | 8 | 41 | 63.4 | 93.6 | 14 | 11 | 16.2 | 69.2 |
| | 18 months | 6 | 42 | 66.2 | 88.3 | 12 | 11 | 15.7 | 69.0 |
| | 24 months | 6 | 37 | 61.5 | 81.7 | 10 | 19 | 28.0 | 72.1 |
| A2 | 1 months | 45 | 3 | 2.4 | 42.4 | 48 | 3 | 4.5 | 48.8 |
| | 3 months | 26 | 6 | 6.5 | 62.2 | 29 | 5 | 6.8 | 63.6 |
| | 6 months | 18 | 12 | 17.9 | 71.2 | 22 | 6 | 10.2 | 65.6 |
| | 12 months | 7 | 41 | 63.0 | 93.0 | 12 | 11 | 14.5 | 70.0 |
| | 18 months | 2 | 45 | 71.2 | 92.5 | 12 | 14 | 17.9 | 72.1 |
| | 24 months | 5 | 37 | 62.7 | 86.4 | 10 | 19 | 26.6 | 65.2 |

مورد بررسی در مقایسه با دوره پایه، مدت زمان طولانی‌ترین دوره به جز برای مقیاس ۲۴ ماهه که از ۱۷ ماه به ۱۹ ماه افزایش یافته است در سایر مقیاس‌ها کاهش یافت. همچنین به طور مشابه مقادیر بیشترین مازاد نیز به جز برای مقیاس ۲۴ ماهه برای سایر مقیاس‌ها

بررسی تعداد دوره‌های مرطوب در دوره‌ی ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ بر اساس سناریوهای انتشار A1B و A2 نشان می‌دهد در تمامی مقیاس‌ها نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (جدول ۷). همچنین در اثر نوسانات اقلیمی با افزایش تعداد دوره‌های مرطوب در مقیاس‌های

که شاخص‌های مبتنی بر بارندگی نظیر SPI نمی‌توانند اثر افزایش دما را برای نوسانات اقلیمی در نظر بگیرند از شاخص جدید SPEI برای پایش وضعیت‌های رطوبتی در مقیاس‌های زمانی سالانه و همچنین ۱ و ۳ و ۶ ماهه (کوتاه‌مدت) و ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه (بلندمدت) برای دوره‌های پایه و آتی استفاده گردید که بر پایه نتایج آن وضعیت‌های خشکسالی شدید سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ که بخش زیادی از کشور را در بر گرفت به خوبی در ایستگاه همدان قابل مشاهده است. همچنین بر اساس نتایج پایش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، می‌توان انتظار داشت دهه اول پیش‌بینی نسبت به دهه‌های دوم و سوم دارای تغییرات رطوبتی بیشتری باشد که نیازمند توجه و اقدامات مدیریتی بیشتر می‌باشد.

مقایسه ویژگی‌های استخراج شده دوره‌های خشک در دوره پایه و دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نشان می‌دهد که در اثر نوسانات اقلیمی انتظار می‌رود در مقیاس‌های کوتاه مدت ۱ و ۳ ماهه تعداد دوره‌های خشک افزایش و در مقیاس‌های بلندمدت ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه کاهش یابد به طوری که در مقیاس‌های بلند مدت طول دوره خشک افزایش و ماندگاری شرایط خشکسالی بیشتر شود. بررسی و مقایسه ویژگی‌های دوره‌های مرطوب در آینده نسبت به دوره پایه نیز نشان می‌دهد در تمامی مقیاس‌های زمانی تعداد دوره‌های مرطوب افزایش می‌یابد و طولانی‌ترین دوره به جز در مقیاس ۲۴ ماهه در سایر مقیاس‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بررسی حجم مازادها نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که می‌تواند نشانگر افزایش کمبود رطوبتی در دهه‌های آتی باشد.

مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشکسالی نظیر SPI که کاربرد زیادی نیز دارند این است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی داراست. از این رو پیشنهاد می‌شود در مطالعات بررسی اثر تغییر اقلیم از شاخص‌هایی که تنها مبتنی بر بارندگی هستند به تنهایی استفاده نشود و از شاخص‌هایی که علاوه بر مقدار بارش اثرات دمایی را به طور مستقیم یا از طریق مقادیر تبخیر و تعرق در نظر می‌گیرند نظیر شاخص SPEI استفاده شود.

کاهش یافته است. بررسی مجموع مازادها طی سه دهه آتی در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد که مقادیر مجموع مازادها برای دوره‌های مرطوب در همه‌ی مقیاس‌ها به جز مقیاس کوتاه مدت ۱ ماهه نسبت به دوره پایه کمتر می‌باشد که می‌تواند بیانگر افزایش تنش‌های رطوبتی در دهه‌های آتی باشد.

نتیجه‌گیری کلی

پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن، یکی از چالش‌های مهم مدیریت منابع آب در قرن حاضر می‌باشد. بررسی نحوه تغییر شرایط خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشد زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلندمدت، لازم است که چشم‌اندازی از وضعیت آینده بارندگی و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه ترسیم گردد. در این تحقیق ریزمقیاس‌نمایی شرایط اقلیم آتی در ایستگاه سینوپتیک همدان (فرودگاه) با اجرای گروهی داده‌های ۵ مدل GCMs شامل: HADCM3، MPEH5، IPCM4، GFCM21 و NCCCS موجود در مدل LARS-WG5 بر مبنای سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 در دوره آماری ۲۰۴۰-۲۰۱۱ انجام گردید. در ادامه تجزیه و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت‌های رطوبتی بر مبنای تئوری ران و شاخص جدید SPEI مورد بررسی قرار گرفت که نتایج کلی حاصل از آن به صورت زیر می‌باشند:

مدل LARS-WG5 قادر به شبیه‌سازی رفتار متغیرهای اقلیمی دما و بارش برای دهه‌های پیش‌بینی می‌باشد که بر اساس نتایج آن مقدار دمای حداقل و حداکثر در تمامی ماه‌های سال بر مبنای هر سه سناریوی مورد بررسی دارای روند افزایشی نسبت به دوره پایه می‌باشند. همچنین بررسی مقادیر میانگین ماهانه بارش شبیه‌سازی شده نیز نشان داد طی سه دهه آتی مقادیر بارش‌های ماه‌های فوریه، آوریل و اکتبر افزایش و ماه‌های مارس، می و نوامبر کاهش می‌یابند. با توجه به افزایش ۲/۵ درصدی مقدار بارش و افزایش مقدار میانگین متوسط دما به میزان ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه در سناریوی محتمل A2 و از طرفی با در نظر گرفتن این موضوع

منابع

- 1- Abramowitz M., and Stegun I.A. 1965. Handbook of mathematical functions, with formulas, graphs, and mathematical tables. Dover Publications.
- 2- Ashraf B., Mousavi Baygi M., Kamali G.A., and Davari K. 2011. Prediction of water requirement of sugar beet during 2011-2030 by using simulated weather data with LARS-WG downscaling model. Journal of Water and Soil, 25 (5): 1184-1196 (In Persian with English abstract).
- 3- Ashraf B., Alizadeh A., Mousavi Baygi M., and Bannayan Awal M. 2014. Verification of temperature and precipitation simulated data by individual and ensemble performance of five AOGCM models for north east of Iran. Journal of Water and Soil. 28 (20): 253-266 (in Persian with English abstract).
- 4- Blekinsop B., and Fowler H.J. 2007. Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. Journal of Hydrology, 342: 50-71.

- 5- Bryant E.A. 1991. Natural Hazards. Cambridge, New York and Melbourne: Cambridge University Press.
- 6- Burke E.J., and Brown S.J. 2008. Evaluating uncertainties in the projection of future drought. *Journal of Hydrometeor*, 9: 292–299.
- 7- Burke E.J., Brown S.J., and Christidis N. 2006. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre Climate Model. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 1113–1125.
- 8- Dubrovsky M., Svoboda M.D., Trnka, M., Hayes M.J., Wilhite D.A., Zalud Z., and Hlavinka P. 2008. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical Applied Climatology*, 96: 155–171.
- 9- Edwards D.C., and McKee T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report*, 97, 2: Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- 10- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2006. National strategy and action plan on drought Preparedness, management and mitigation in the agricultural sector prepared with the assistance of the through the TCP Project No. 3003 /IRA, V 1, P 60.
- 11- Golmohammadi M., and Massah Bavani A. 2011. The perusal of climate change impact on drought intensity and duration *Journal of Water and Soil*, 25 (2): 315–326 (in Persian with English abstract)
- 12- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Synthesis Report 2007, AR4, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- 13- Jones P.D., and Moberg A. 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal Climate*, 16: 206–223.
- 14- Keyantash J., and Dracup J.A. 2002. The Quantification of Drought Indices, *American Metrological Society*, 83(8): 1167–1180.
- 15- Khazanedari L., Zabol Abasi F., Ghandhari Sh., Kouhi, M., and Malbousi, Sh. 2010. Drought conditions in the next thirty years in Iran. *Journal of Geography and Regional Development Research*, 12: 83-98 (In Persian with English abstract).
- 16- Kirono D.G.C., Kent D.M., Hennessy K.J., and Mpelasoka F. 2011. Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: Results from 14 global climate models. *Journal of Arid Environments*, 75: 566–575.
- 17- Lloyd–Hughes B., and Saunders M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International. Journal Climatology*, 22: 1571–1592.
- 18- McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, 179–184.
- 19- Mishra A.K., and Singh V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391: 202–216.
- 20- Mishra A.k., Singh V.P., and Desai V.R. 2009. Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environ Research Risk Assess*, 23: 41–55.
- 21- Nicholls N. 2004. The changing nature of Australian droughts. *Climatic Change*, 63: 323–336.
- 22- Pereira A.R., and Pruitt W.O. 2004. Adaptation of the thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 66: 251–257.
- 23- Racsko P., Szeidl L., and Semenov M. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling*, 57: 27–41.
- 24- Rebetez M., Mayer H., Dupont, O., Schindler D., Gartner K., Kropp J.P., and Menzel A. 2006. Heat and drought 2003 in Europe: A climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63: 569–577.
- 25- Salehnia N., Mossavi Baygi M., and Ansari H. 2013. Drought prediction with PDSI, Lars–WG5 and HadCM3 (case study Neyshabour basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7(1): 93–103 (in Persian with English abstract)
- 26- Semenov M.A., and Barrow E.M. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climate Change*, 35: 397–414.
- 27- Semenov M., and Stratonovitch P. 2010. Use of multi–model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41: 1-14.
- 28- Sheffield J., and Wood E.F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi–model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dyn.*, 31: 79–105.
- 29- Solomon S.D., Qin M., Manning M., Marquis K., Averyt M.M.B., Tignor H.L., Miller Jr., and Z. Chen Eds. 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 996 pp.
- 30- Tigkas D. 2008. Drought characterisation and monitoring in regions of Greece. *European Water* 23/24, 29–39.
- 31- Tsakiris G., Nalbantis I., Pangalou D., Tigkas D., and Vangelis H. 2008. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). In: Franco Lopez, A. (Ed.), *Proceedings of the 1st International Conference “Drought Management: scientific and Technological Innovations”*, Option Méditerranéennes, Series A, No. 80, Zaragoza, Spain, 12–14 June 2008, 57–62.
- 32 - Tsakiris G., Pangalou D., and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance

- Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21: 821–833.
- 33- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., and López-Moreno J.I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23(7): 1696– 1718.
- 34- Wilhite D.A. 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, vol. 1. Routledge, New York, 1–18.



Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change

H. Zare Abyaneh¹ - M.Ghabaei Sough² - A. Mosaedi^{3*}

Received: 18-06-2014

Accepted: 25-02-2015

Introduction: Drought is a natural and recurrent feature of climate. The characterizations of it may change under the effect of climate change in future periods. During the last few decades a number of different indices have been developed to quantify drought probabilities. Droughts are caused by disruptions to an expected precipitation pattern and can be intensified by unusually high temperature values. Precipitation-based drought indices, including the Standardized precipitation index (SPI), cannot identify the role of temperature increase in drought condition and in addressing the consequences of climate change. Recently, two new standardized drought indices have been proposed for drought variability analysis on multiple time scales, the Reconnaissance Drought Index (RDI, Tsakiris et al., 2007) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010). The objective of this study is to evaluate the characterization of wet and dry periods under the effect of climate change according to SPEI index in synoptic station of Hamedan for the next thirty years (2011-2040).

Materials and Methods: In this study, the indices of SPEI, SPI and RDI were investigated and the SPEI index as a multiscalar and suitable index was used to detect, monitor, and explore the consequences of global warming on drought conditions in synoptic station of Hamedan (airport). For this purpose, the period of 1981-2010 was chosen as the base period and the simulation of the future climate variables were done based on A1B, A2 and B2 emissions scenarios and performance of multi model ensemble via LARS-WG5 model for the period of 2011-2040. The performance of the multi model ensemble was done by using five global climate models including IPCM4, MPEH5, HADCM3, GFCM21, and NCCCS in the IPCC Fourth Assessment Report (Semenov and Stratonovitch, 2010). By simulating the values of precipitation, and the values of temperature and the values of estimated evapotranspiration, the values of SPEI, RDI and SPI indices were calculated annually and 1, 3 and 6 months (short-term period) and 12, 18 and 24 months (long-term period) time scales for the base period and the three next decades. Then, the relation among them was computed and investigated via correlation coefficient. Then, by monitoring the humidity condition via SPEI index, the characterization of wet and dry periods including period numbers, longest period, total deficit or surplus, and maximum deficit or surplus were derived based on Run theory and were comprised for the base period and three future decades.

Results and Discussion: Evaluation of LARS-WG5 model for base period showed that the model was able to simulate minimum and maximum temperatures and precipitation data with high accuracy based on statistic error and can be used to generate data for future years according to emission scenario. According to the simulated results of performance of multi model ensemble, the average values of mean temperature and precipitation will increase by 0.82°C and 2.5 % for A2 scenario, respectively. In addition, the minimum and maximum temperatures have increased in all of the months according to the three scenarios in comparison with the base period. The correlation results between the investigated indices showed that the maximum and minimum of correlation can be observed between SPI & RDI and SPEI & SPI indices in the base period and future decade for each scenario, respectively. Drought assessment based on the SPEI index in the base period shows that the main drought episodes occurred in the 1999 to 2001 that were consistent with FAO report (2006). Comparison of wet and dry periods in relation to the base period showed that the number of dry periods will increase in time scales of 1 and 3 months and will decrease in other long-term time scales.

Conclusion: Climate change and its effects are among the main challenges of water resources management in the present century. In this study, the effects of this phenomenon on drought monitoring and change of characterizations were investigated. For this purposes, we used daily meteorological variables during thirty years (1981-2010) from Hamedan Synoptic station. The results of drought monitoring were based on SPEI index, and it revealed the high variability of humidity condition in the first decade of simulation in comparison with the

1,2- Associate Professor and PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: Mosaedi@um.ac.ir)

second and third decades. This issue indicated that this decade requires more attention and management measurements. Also, according to the results of the derived characterization via Run theory, the number of dry periods will decrease and persistence of the longest dry period and consequently the volume of deficit will increase in the next three decades. In addition, the total volume surplus of wet periods will decrease in relation to the base period that can be interpreted as the increasing of moisture deficit in future decades. The SPEI is based on precipitation and temperature data, and it has the advantage of combining multiscalar character with the capacity to include the effects of temperature variability on drought assessment. Thus, we recommend SPEI, as a suitable index for studying and identifying the effect of climate change on drought conditions.

Keywords: Climate Change, Drought, Multi Model Ensemble, Run Theory, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)