

The Evaluation of Climate Change Impact on Agricultural Drought by Soil Moisture Deficit Index Using Fifth Report Models and Scenarios

SAEID GHAVAMSAEIDI NOGHABI^{1*}, MOSTAFA YAGHOOBZADEH¹, MOHAMMAD HOSSEIN NAJAFI MOOD¹

1. Department of Science and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
(Received: June. 11, 2019- Revised: July. 16, 2019- Accepted: July. 22, 2019)

ABSTRACT

Soil moisture is a determinative parameter in many of the complex environmental processes and plays a decisive role in the occurrence of agricultural drought. So, in this study, based on estimated soil moisture data by SWAP model and Fifth Report Data of Climate Change, agricultural drought was determined by Soil Moisture Deficit Index for the upcoming period (2020-2039) for the wheat field of Faroub in Neyshabour. The climatic data were estimated using six models of GCM and two emission scenarios of 4.5 and 8.5 and were downscaled by LARS-WG model. Then the downscaled climatic data along with field, irrigation and soil data were entered into the SWAP model. Finally, using soil moisture data of 0-30 cm depth, agricultural drought was evaluated using SMDI index. The results showed that the minimum and maximum temperatures and precipitation in the upcoming period have increased compared to the base period and 8.5 scenario have estimated a higher temperature and lower rainfall than the 4.5 scenario. Also, the average SMDI in the upcoming period has increased relative to the base period for both scenarios. The certainty results of GCM models for estimation of SMDI index also showed that under the 4.5 scenario, the IPSL and MIROC models have the highest certainty and the Canesm2 model has the lowest certainty. Under the 8.5 scenario, MIROC model has the highest certainty and Ciromk-3.6 and GFDL models have the lowest certainty.

Keywords: Emotion scenario, GCM model, Soil Moisture Deficit Index, SWAP model, Uncertainty

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI با استفاده از مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم

سعید قوام‌سعیدی نوقابی^{۱*}، مصطفی یعقوب‌زاده^۲، محمدحسین نجفی مود^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۴/۳۱)

چکیده

رطوبت خاک یک پارامتر تعیین‌کننده در بسیاری از فرآیندهای پیچیده زیست محیطی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع خشکسالی کشاورزی دارد. لذا در این تحقیق، با استفاده از داده‌های برآورد شده رطوبت خاک توسط مدل SWAP و داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم، خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص کمبود رطوبت خاک برای دوره آتی (۲۰۳۹-۲۰۲۰) برای مزرعه گندم فاروب نیشابور تعیین شد. داده‌های اقلیمی به کمک شش مدل GCM و دو سناریو انتشار ۴/۵ و ۸/۵ برآورد و توسط مدل LARS-WG ریزمقیاس شدند. سپس داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده به همراه داده‌های زراعی، خاک و آبیاری وارد مدل SWAP گردید. در نهایت با استفاده از داده‌های رطوبت عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک، خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، دمای مینیمم، ماکزیمم و بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و سناریو ۸/۵ نسبت به سناریو ۴/۵ دمای بیشتر و بارش کمتری را برآورد کرده است. همچنین میانگین SMDI در دوره آتی نسبت به دوره پایه برای هر دو سناریو افزایش یافته است. نتایج قطعیت مدل‌های GCM در برآورد شاخص SMDI نیز نشان داد. تحت سناریو ۴/۵ مدل‌های IPSL و MIROC بیشترین قطعیت و مدل Canesm2 کمترین قطعیت ولی تحت سناریو ۸/۵ مدل MIROC بیشترین قطعیت و مدل‌های GFDL و Csiromk-3.6 کمترین قطعیت را دارند.

واژه‌های کلیدی: سناریو انتشار، شاخص کمبود رطوبت خاک، عدم قطعیت، مدل GCM، مدل SWAP

مقدمه

رطوبت خاک یک پارامتر تعیین‌کننده در بسیاری از فرآیندهای پیچیده زیست محیطی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع خشکسالی کشاورزی دارد (Keshavarz et al., 2011). اساساً پایش مستقیم رطوبت خاک و استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای، نه تنها پرهزینه و وقت‌گیر است، بلکه در سطوح وسیع غیر عملی می‌باشد. این در حالی است که خشکسالی پدیده‌ای منطقه‌ای بوده و برای پایش آن نیاز به داده‌های وسیع و منطقه‌ای است. بنابراین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای رطوبت خاک کافی نبوده و نیاز به ابزاری برای افزایش دامنه داده‌ها و کاهش هزینه‌ها وجود دارد (Hosseinzadeh et al., 2018). امروزه برای ارزیابی داده‌های رطوبت خاک، مدل‌های زیادی توسعه یافته‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل SWAP (مدل خاک، آب، اتمسفر و گیاه) می‌باشد که برای شبیه‌سازی توازن آب و مواد محلول در یک خاک کشت‌شده با انواع مختلف شرایط مرزی شامل امکان زهکشی و مدیریت‌های مختلف آبیاری بکار می‌رود. به منظور تعیین میزان خشکسالی در آینده، تحقیقاتی در داخل و خارج کشور در این زمینه انجام شده است. Ramezani

خشکسالی کشاورزی بخشی از اقلیم زمین است و هرازگاهی بدون هیچ علائم هشدار دهنده و در محدوده‌ای با مرزهای غیر قابل تشخیص اتفاق می‌افتد و بیش از تمامی حوادث طبیعی دیگر، امنیت غذایی مردم را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Vicente-Serrano et al., 2018). یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های خشکسالی با دیگر بلایای طبیعی این است که به آرامی شروع می‌شود و بعد از آن، علاوه بر منطقه‌ای که در آن رخ داده است، مناطق مجاور را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد. اثرات نامطلوب این پدیده در همه بخش‌ها مانند منابع آب، کشاورزی، محیط زیست و اجتماع به تدریج خود را نمایان می‌سازد (Ghorbani Aghdam et al., 2012). برخلاف سیلاب که قابل اندازه‌گیری مستقیم می‌باشد، خشکسالی‌ها اغلب اوقات به صورت توصیفی و کیفی ارائه می‌شوند. یکی از تعاریف جامع در مورد خشکسالی که از مقبولیت جهانی برخوردار است، خشکسالی‌ها را در چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی گروه‌بندی کرده است (Yaghoobzadeh, 2015).

SPEI در شرایط تغییر اقلیم نسبت به SPI قابلیت بهتری در نشان دادن وضعیت خشکسالی دارد.

با توجه به اینکه در خصوص خشکسالی کشاورزی دوره آتی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم، تحقیقاتی در داخل و خارج از کشور انجام نشده است، بنابراین در این تحقیق سعی شده است، به کمک داده‌های برآورد شده رطوبت خاک توسط مدل SWAP و مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم، خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI برای دوره آتی تعیین شود و با دوره پایه مقایسه گردد. در نهایت سعی شد قطعیت مدل‌ها و سناریوها به کمک نمودار جعبه‌ای یا باکس پلات بررسی شود.

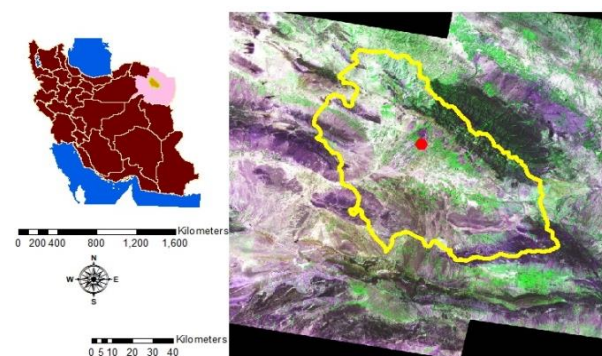
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، مزرعه گندم فاروب دشت نیشابور مورد مطالعه قرار گرفته است. این دشت با وسعت ۷۲۹۳ کیلومتر مربع جزئی از حوضه آبریز کویر مرکزی بوده که ۴۱۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت (۵۶ درصد) و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد (شکل ۱). از نظر موقعیت جغرافیایی در حد فاصل ۱۳' ۵۸° تا ۳۰' ۵۹° طول شرقی و ۴۰' ۳۵° تا ۳۹' ۳۶° عرض شمالی قرار دارد. اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن نیمه‌خشک و خشک بوده و متوسط درجه حرارت و بارندگی آن در طی یک دوره ۳۰ ساله به ترتیب ۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۲۹۲ میلی‌متر می‌باشد (Yaghoobzadeh et al., 2017). کشت گندم در این منطقه به‌صورت پاییزه بوده و مشخصات کاشت و برداشت گیاه در جدول (۱) و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات کاشت و برداشت گیاه مورد استفاده در مزرعه آزمایشی

تاریخ کاشت		تاریخ برداشت	
تاریخ میلادی	روز ژولیوسی	تاریخ میلادی	روز ژولیوسی
۱/۱۰/۲۰۰۸	۲۷۵	۳۰/۶/۲۰۰۹	۱۸۱



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان

Etedali et al., (2012) جهت تعیین شاخص خشکسالی SMDI و مقایسه آن با سایر شاخص‌های خشکسالی مثل PNI، DI، SPI و CZI، رطوبت خاک را با استفاده از مدل AquaCrop بین سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ در ایستگاه سینوپتیک قزوین شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد، بیشترین مقدار شاخص SMDI در سال ۱۹۹۴ با مقدار ۲/۷ و کمترین مقدار آن در سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۸ با مقدار ۱/۵- رخ داده است. در تحقیق Jalali et al. (2013) به‌منظور ارزیابی شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) در پایش خشکسالی کشاورزی، از شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) استفاده شد. همبستگی قابل قبول SMDI با CDSI و نیز مقادیر بارندگی، نتیجه رضایت‌بخشی از شاخص SMDI به‌عنوان ابزاری در پایش خشکسالی کشاورزی بود. (Pirmia et al., 2018) وضعیت خشکسالی حوضه آبخیز تمر (بالادست سد گلستان) را با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI بررسی کردند. به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 از مدل SDSM برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ استفاده شد. نتایج شاخص SPI نشان داد، در هر دو دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و آتی (۲۰۴۹-۲۰۲۰) بیشترین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به‌ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دو دوره رخ داده‌اند. از آنجا که در محاسبه شاخص SPEI پارامترهای اقلیمی بیشتری علاوه بر بارندگی برای ارزیابی خشکسالی لحاظ می‌شود، بنابراین ارزیابی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI، شرایط خشکسالی شدیدتری را نسبت به شاخص SPI نشان داد.

(Narasimhan and Srinivasan, 2005) در ایالات تگزاس برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق‌های مختلف از مدل SWAT و برای بررسی وضعیت خشکسالی در طی دوره ۱۹۹۸-۱۹۰۱ از شاخص SMDI اصلاح شده استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که ضریب تعیین این شاخص با شاخص‌های SPI و PDSI برابر ۰/۶۵ و با شاخص ETDI برابر ۰/۷۹ است. همچنین تبخیر و تعرق گیاهان وابستگی بیشتری به شاخص SMDI نسبت به شاخص‌های SPI و PDSI دارد. (Dubrovsky et al., 2009) از دو شاخص خشکسالی Rpsdi و Rspi برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در آینده استفاده کردند. این دو شاخص به‌ترتیب از واسنجی شاخص‌های PDSI و SPI در این منطقه بدست آمد. نتایج آنها نشان داد که سناریوهای تغییر اقلیم جهانی، افزایش بارش را با استفاده از شاخص SPI و افزایش درجه حرارت و بارش را با استفاده از شاخص PDSI، در آینده برآورد می‌کنند. (Chunping et al., 2015) تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی را با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI در شرایط تغییر اقلیم در منطقه‌ای در چین بررسی کردند. نتایج حاصل از این ارزیابی نشان داد، شاخص

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک (cm)	هدایت الکتریکی (dS/m)	اسیدیته	پژمردگی دائم (درصد حجمی)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	بافت خاک
۰-۳۰	۱/۰۶	۸	۷/۳	۲۰/۱	۱/۵۱	سیلتی لوم

روش تحقیق

برای انجام این تحقیق ابتدا مدل SWAP با استفاده از داده‌های هواشناسی و زراعی منطقه اجرا شد و داده‌های رطوبت شبیه‌سازی شده در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت سال زراعی ۲۰۰۹-۲۰۰۸ واسنجی و صحت‌سنجی گردید. عمق ۳۰ سانتی‌متری، عمق موثر توسعه ریشه گیاه گندم بحساب می‌آید و تعیین رطوبت در این عمق نسبت به اعماق دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است (Yaghoobzadeh, 2015). رطوبت در یک یا دو روز بعد از آبیاری توسط دستگاه رطوبت‌سنج TDR اندازه‌گیری شده است که حدوداً مقدار آن معادل ظرفیت زراعی می‌باشد. عمل واسنجی با استفاده از ۶۵ درصد داده‌ها و صحت‌سنجی با استفاده از ۳۵ درصد بقیه داده‌ها در طی دوره رشد گیاه انجام شد. سپس بعد از اطمینان از صحت نتایج مدل SWAP، رطوبت خاک برای دوره پایه (۲۰۱۱-۱۹۹۲) شبیه‌سازی گردید. برای برآورد مقادیر رطوبت در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) به کمک شش مدل و دو سناریو انتشار ۴/۵ و ۸/۵، نسبت مقادیر ماهانه پارامترهای هواشناسی دوره آتی به دوره پایه برآورد گردید. به منظور تولید سناریوهای روزانه پارامترهای هواشناسی دوره آتی به کمک داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۱-۱۹۹۲) ایستگاه سینوپتیک نیشابور، پارامترهای دما و بارش توسط مدل LARS-WG¹ ریزمقیاس شد. سپس مدل SWAP با استفاده از سناریوهای روزانه تغییر اقلیم هواشناسی و داده‌های زراعی دوره پایه، رطوبت موجود در خاک را برای دوره آتی شبیه‌سازی نمود و در نهایت خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI برای دوره آتی تعیین شد و با دوره پایه مقایسه گردید. همچنین برای ارزیابی عدم قطعیت نتایج شاخص SMDI از باندهای عدم قطعیت یا باکس پلات استفاده شد.

شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI)

این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به‌طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، داده‌های رطوبت خاک می‌باشد. این داده‌ها به کمک

مدل شبیه‌ساز رطوبت برای دوره پایه محاسبه شده و شاخص کمبود رطوبت خاک توسط روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود (Narasimhan and Srinivasan., 2005).

(رابطه ۱)

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100 \quad \text{if } SW_{i,j} \leq MSW_j$$

(رابطه ۲)

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100 \quad \text{if } SW_{i,j} > MSW_j$$

در این معادلات، $SD_{i,j}$: درصد کمبود رطوبت خاک، $SW_{i,j}$: میانگین رطوبت خاک در هفته در پروفیل خاک، MSW_j : متوسط درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $\max SW_j$: ماکزیمم درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $\min SW_j$: مینیمم درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، i : نشان‌دهنده تعداد سال، j : نشان‌دهنده تعداد هفته می‌باشد.

درصد کمبود رطوبت خاک از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ درصد، خاک مرطوب‌ترین و در ۱۰۰- درصد، خاک خشک‌ترین وضعیت را دارا می‌باشد. در نهایت شاخص SMDI با استفاده از رابطه (۳) برای هر هفته بدست می‌آید.

$$SMDI_j = \frac{\sum_{t=1}^j SD_t}{(25t + 25)} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در این معادله، t : زمان بر حسب هفته می‌باشد.

به دلیل اینکه اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌صورت هفته به هفته برای یک دوره آماری بلندمدت به‌منظور تعیین خشکسالی سبب می‌شود که تعیین خشکسالی با داده‌های زیادی روبرو شود، بدین منظور شاخص SMDI بر اساس روش پالمر به‌صورت رابطه ۴ اصلاح شده است.

(رابطه ۴)

$$SMDI_j = SMDI_{j-1} + \Delta SMDI_j$$

برای اینکه شدت خشکسالی برای هر ماه محاسبه شود، در رابطه ۳، $i=1$ و $t=1$ قرار داده می‌شود و به شکل زیر مشخص خواهد شد.

سناریوها و مدل‌های مورد استفاده

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های GCM می‌باشند. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم خود از سناریوهای جدید تحت عنوان RCP^۱ استفاده نموده است. سناریوهای RCP شامل یک سناریو خوش‌بینانه (RCP2.6)، دو سناریو حد واسط (RCP4.5, RCP6) و یک سناریو بحرانی (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند (Stocker et al., 2013). خصوصیات مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۴) و مشخصات سناریوهای مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد:

سناریوی RCP4.5: این سناریو توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده است. میزان غلظت دی‌اکسیدکربن در این سناریو تا سال ۲۱۰۰ میلادی، ۷۵۰ ppm تخمین زده شده است و واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای تا قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند. در این سناریو میزان رشد جمعیت کمتر از سناریو RCP2.6 تخمین زده شده است، اما در دیگر پارامترهای موثر در تغییرات اقلیمی (مانند نرخ استفاده از انرژی‌های نو، رشد تکنولوژی و غیره) نسبت به سناریو RCP2.6 ضعیف‌تر در نظر گرفته شده است. در نتیجه سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت این سناریو در واداشت‌های تابشی بیش از سناریو RCP2.6 می‌باشد.

سناریوی RCP8.5: این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و موسسه IIASA به سرپرستی پروفیسور کیوان ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شده است. در صورت عدم اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریو انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. میزان جمعیت برای سال ۲۱۰۰ میلادی در این سناریو حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود که این میزان، جمعیتی بین سناریو A_۱ و A_۲ در سری SRES می‌باشد. در این سناریو میزان غلظت دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی، ۱۹۶۰ ppm تخمین زده شده است. ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. با توجه به میزان جمعیت در نظر گرفته شده در این سناریو و نیاز جمعیت ساکن در کره زمین به تامین انرژی، استفاده از انواع انرژی (به جز انرژی زیستی) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است.

$$SMDI_1 = \frac{SD_1}{50} \quad (\text{رابطه ۵})$$

از آنجایی که رابطه (۵) در ماه اولیه است، لذا رابطه (۴) به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$SMDI_1 - SMDI_0 = \Delta SMDI_1 = \frac{SD_1}{50} \quad (\text{رابطه ۶})$$

خشکسالی در طبقه‌بندی شدید ادامه پیدا نخواهد کرد. زمانی که در ماه‌های بعد در وضعیت نرمال یا نزدیک به نرمال باشد، ادامه پیدا نخواهد کرد. بنابراین برای اینکه روند SMDI حفظ شود، نسبت SD باید افزایش یابد. به همین سبب برای همه ماه‌هایی که بعد از ماه خشک ابتدایی می‌آیند، یک بخش دیگر به رابطه (۵) اضافه خواهد شد.

$$\Delta SMDI_j = \frac{SD_j}{50} + cSMDI_{j-1} \quad (\text{رابطه ۷})$$

برای تعیین مقدار c در رابطه (۷) با فرض اینکه مقدار SMDI برابر ۴- باشد، در یک زمان خاص، مقدار SD برابر ۱۰۰ خواهد بود که به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$\Delta SMDI_j = \frac{100}{50} + c(-4.0), \quad 0 = -2 - 4c \quad c = -0.5$$

با قرار دادن رابطه (۸) در رابطه (۷)، معادله SMDI به صورت زیر مشخص خواهد شد. پس از محاسبه این شاخص، می‌توان به کمک جدول (۳) وضعیت خشکسالی کشاورزی را ارزیابی نمود.

$$SMDI_j = 0.5 \times SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \quad (\text{رابطه ۹})$$

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقدار شاخص کمبود رطوبت خاک (Palmer, 1968)

مقدار SMDI	طبقه خشکسالی
بیشتر از ۴	به شدت مرطوب
۳ تا ۳/۹۹	خیلی مرطوب
۲ تا ۲/۹۹	رطوبت متوسط
۱ تا ۱/۹۹	رطوبت خفیف
۰/۵ تا ۰/۹۹	دوره مرطوب اولیه
۰/۴۹ تا -۰/۴۹	نرمال
-۰/۹۹ تا -۰/۵	دوره خشکی اولیه
-۱/۹۹ تا -۱/۰	خشکسالی خفیف
-۲/۹۹ تا -۲/۰	خشکسالی متوسط
-۳/۹۹ تا -۳/۰	خشکسالی شدید
کمتر از -۴/۰	خشکسالی بسیار شدید

جدول ۴- خصوصیات مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق

سناریوهای انتشار	نام مدل	کشور مؤسس	اندازه تفکیک (طول× عرض جغرافیایی، درجه)
	Canesm2	کانادا	۱/۲۵×۱/۸۷۵
	GFDL	آمریکا	۲/۵×۲
RCP4.5 & RCP8.5	MIROC	ژاپن	۱/۷۷×۲/۸۱
	IPSL	فرانسه	۱/۸۷۵×۳/۷۵
	Csiromk-3.6	استرالیا	۱/۸×۱/۸
	GISS-ES-R	آمریکا	۲×۲

مدل ریزمقیاس نمایی

پیش‌بینی‌های اقلیمی خروجی مدل‌های GCM به صورت میانگین‌های ماهانه می‌باشند، در صورتی که مدل SWAP به سری‌های زمانی روزانه آب و هوا نیازمند است. از طرفی قدرت تفکیک مکانی کم مدل‌های GCM به این معنی است که خروجی این مدل‌ها برای استفاده مستقیم در مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه مناسب نیست. به همین دلیل خروجی مدل‌های GCM نیاز به تکنیک‌های مختلف ریزمقیاس کردن دارند. برای تولید داده‌های روزانه و ریزمقیاس شده بارش و دما از مولد وضع هوای تصادفی LARS-WG استفاده شد (Yaghoobzadeh *et al.*, 2018). این مدل یکی از مشهورترین مدل‌های آماری در ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی جو محسوب می‌شود که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های حداقل و حداکثر روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم پایه و آینده بکار می‌رود (Kadempor *et al.*, 2019). مدل LARS-WG برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را بکار می‌برد. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، یک توزیع نیمه‌تجربی می‌باشد (Babaeian *et al.*, 2009). این مدل برای مدل‌سازی بارش و احتمال وقوع آن از روش توزیع نیمه‌تجربی و زنجیره مارکف استفاده می‌کند. مدل‌سازی دما نیز با استفاده از سری فوریه انجام می‌گیرد (Semenov, 2008). مدل LARS-WG توانایی مدل‌سازی دوره‌های گذشته و آینده را دارد و برای هر گونه مدل‌سازی نیازمند یک سناریو اقلیمی ویژه می‌باشد. همچنین از این مدل می‌توان برای مدل‌سازی داده‌های گمشده و خلأهای

آماری استفاده نمود.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAP

برای اینکه بتوان از رطوبت شبیه‌سازی شده با مدل SWAP استفاده کرد، ابتدا باید نتایج مدل SWAP را با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی و صحت‌سنجی نمود. نتایج تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد که مدل نسبت به ضرایب α و n حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی به این صورت انجام شد که هر بار، همه به جز یکی از پارامترهای هیدرولیکی ثابت در نظر گرفته شد تا بدین وسیله مشخص گردد کدام پارامتر بر روی رطوبت خاک نسبت به بقیه پارامترهای هیدرولیکی خاک موثرتر می‌باشد. جدول (۵) پارامترهای هیدرولیکی خاک بعد از واسنجی را نشان می‌دهد. در این تحقیق همچنین گراف نقطه‌ای بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAP ترسیم و در شکل (۲) ارائه شده است. وجود ضرایب تبیین (R^2) ۷۹/۵ و ۷۲ درصد بین نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده توانایی مدل SWAP در شبیه‌سازی رطوبت عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک می‌باشد که در جدول (۶) ارائه شده است. Lalehzari *et al.* (2017) به منظور ارزیابی مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مدل SWAP و اندازه‌گیری شده در مزرعه، مقدار R^2 را برای اراضی آبی و دیم به ترتیب برابر ۸۸ و ۸۲ درصد گزارش کردند که با نتایج این بخش مطابقت دارد.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بعد از واسنجی

عمق خاک (سانتی‌متر)	n (-)	α (cm^{-1})	Ksat (cmd^{-1})	sat θ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	θ_{res} ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
۳۰-۰	۱/۳۲	۰/۰۲۴	۹/۹۵۵	۰/۳۷۶	۰/۰۶۶



شکل ۲- واسنجی (بالا) و صحت‌سنجی (پایین) مدل SWAP با داده‌های رطوبت عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک

جدول ۶- ارزیابی مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده

عمق خاک (سانتی‌متر)	ارزیابی مدل	MAE (%)	RMSE (%)	R ² (%)
۳۰-۰	واسنجی	۰/۰۴۵	۲/۳۱	۷۹/۵
	صحت‌سنجی	۰/۱۲	۲/۴۷	۷۲

اثرات تغییر اقلیم

۱- اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

برای تولید داده‌های اقلیمی و مشخص شدن تغییرات آن‌ها در دوره آتی، از شش مدل GCM در ترکیب با دو سناریو انتشار ۴/۵ و ۸/۵ استفاده شد. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای مینیمم، ماکزیمم و بارش بوده که یکی از مهم‌ترین موارد تاثیرگذار بر رطوبت خاک می‌باشند. جدول (۷) مقادیر متوسط روزانه پارامترهای اقلیمی را در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. با توجه به جدول، دمای مینیمم، ماکزیمم و بارش برای دوره آتی نسبت به دوره پایه (baseline) افزایش می‌یابد. Sayari et al., (2013) مشابه نتایج این بخش، افزایش اندک در بارش، دمای ماکزیمم و مینیمم را برای سال‌های دوره آتی گزارش کردند. از طرفی به‌منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو ۸/۵ نسبت به سناریو ۴/۵، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می‌دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو ۸/۵ می‌باشد. در تحقیق Yaghoobzadeh et al., (2017) که با استفاده از داده‌های گزارش چهارم تغییر اقلیم انجام شد، سناریو A₂ نسبت به B₁، افزایش

بیشتری در دما و بارش داشت و این امر، بحرانی بودن سناریو A₂ را آشکارتر می‌کند که به‌منظور مقایسه با نتایج این تحقیق، مشاهده می‌شود سناریو ۸/۵ افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش و سناریو A₂ افزایش بیشتری در هر دو پارامتر دما و بارش را نسبت به سناریو مقابل خود نشان می‌دهند و این بیانگر تفاوت داده‌های گزارش پنجم با گزارش چهارم تغییر اقلیم می‌باشد.

جدول ۷- مقادیر متوسط روزانه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

سناریوهای انتشار	دمای مینیمم (سانتی‌گراد)	دمای ماکزیمم (سانتی‌گراد)	بارش (میلی‌متر)
baseline	۶/۸۰	۲۲/۰۸	۰/۶۳
RCP4.5	۸/۴۰	۲۲/۲۲	۰/۷۱
RCP8.5	۸/۶۴	۲۲/۵۶	۰/۶۹

۲- اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی

شاخص SMDI، کمبود رطوبت خاک را در طی دوره رشد گیاه (از هفته اول پس از رشد تا هفته برداشت گیاه) نشان می‌دهد. بنابراین کمبود شدید رطوبت خاک در یک هفته ممکن است

آتی نسبت به دوره پایه برای هر دوسناریو ۴/۵ و ۸/۵ افزایش می‌یابد. همچنین به‌منظور مقایسه سناریوها در برآورد SMDI سالیانه، سناریو ۴/۵ مقادیر بیشتری را نسبت به سناریو ۸/۵ نشان می‌دهد. از طرفی مقادیر میانگین SMDI سالیانه برای دوره پایه و آتی، نشان دهنده وضعیت نرمال بوده در صورتی که مقادیر حداقل SMDI سالیانه برای دوره پایه و آتی، خشکسالی شدید را نشان می‌دهند. به عبارتی گیاه در طی مراحل رشد خود، دچار خشکی شدید ناشی از کمبود رطوبت خاک شده است.

جدول ۹- مقادیر متوسط SMDI سالیانه در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

سناریوهای انتشار	SMDI سالیانه		
	میانگین	حداکثر	حداقل
baseline	-۰/۰۴۹	۳/۸۴۲	-۳/۹۵۳
RCP4.5	۰/۰۵۶	۳/۸۷۴	-۳/۷۵۶
RCP8.5	۰/۰۰۶	۳/۷۸۲	-۳/۸۲۴

جدول (۱۰) مقادیر متوسط حداقل، حداکثر و میانگین SMDI هفتگی را در دوره پایه و آتی برای شش مدل GCM و دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. بر طبق این جدول، برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵، مقادیر میانگین SMDI هفتگی برآورد شده توسط هر شش مدل در محدوده وضعیت نرمال می‌باشد. همچنین بیشترین و کمترین مقادیر میانگین SMDI هفتگی نیز به ترتیب مربوط به مدل‌های Canesm2 و GISS-ES-R برای سناریو ۴/۵ و مدل‌های GFDL و MIROC برای سناریو ۸/۵ می‌باشد.

جدول ۱۰- مقادیر متوسط SMDI هفتگی برای شش مدل GCM تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

مدل	سناریوهای انتشار					
	RCP4.5			RCP8.5		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
Canesm2	-۰/۷۸۴	۰/۵۰۳	-۰/۲۵۹	-۱/۱۶۲	۰/۱۴۲	-۰/۳۷۳
GFDL	-۰/۹۷۲	۰/۳۶۴	-۰/۳۴۸	-۱/۰۲۵	۰/۴۲۷	-۰/۰۵۱
MIROC	-۱/۱۱۴	۰/۰۲۳	-۰/۴۳۵	-۱/۳۴۳	۰/۰۴۴	-۰/۴۷۹
IPSL	-۱/۲۱۶	۰/۳۱۰	-۰/۳۳۲	-۱/۱۵۸	۰/۶۶۵	-۰/۲۲۶
Csiromk-3.6	-۰/۹۰۹	۰/۴۲۶	-۰/۲۹۷	-۰/۹۶۴	۰/۵۴۱	-۰/۳۶۸
GISS-ES-R	-۱/۷۴۸	۰/۱۶۱	-۰/۴۴۰	-۱/۲۷۴	۰/۶۶۰	-۰/۲۱۳
baseline	-۱/۱۵۴	۰/۳۳۳	-۰/۱۹۰	-۱/۱۵۴	۰/۳۳۳	-۰/۱۹۰

سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. بر طبق این جدول، برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵، مقادیر میانگین SMDI سالیانه برآورد شده

توسط هفته‌ای که آبیاری در آن صورت گرفته و یا بارش اتفاق افتاده جبران و یا تعدیل شود. جدول (۸) مقادیر متوسط حداقل، حداکثر و میانگین SMDI هفتگی را برای هر هفته از ۳۳ هفته دوره رشد گیاه در طی دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. با توجه به جدول، می‌توان بیان نمود که میانگین SMDI هفتگی در دوره آتی نسبت به دوره پایه برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ کاهش می‌یابد. همچنین به‌منظور مقایسه سناریوها در برآورد SMDI هفتگی، سناریو ۴/۵ مقادیر کمتری را نسبت به سناریو ۸/۵ نشان می‌دهد. از طرفی مقادیر میانگین SMDI هفتگی برای دوره پایه و آتی، بیانگر وضعیت نرمال بوده در صورتی که مقادیر حداقل SMDI هفتگی دوره پایه و آتی، خشکسالی خفیف را نشان می‌دهند.

جدول ۸- مقادیر متوسط SMDI هفتگی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

سناریوهای انتشار	SMDI هفتگی		
	میانگین	حداکثر	حداقل
baseline	-۰/۱۹۰	۰/۳۳۳	-۱/۱۵۴
RCP4.5	-۰/۳۵۲	۰/۵۰۳	-۱/۷۴۸
RCP8.5	-۰/۲۸۵	۰/۶۶۵	-۱/۳۴۳

جدول (۹) مقادیر متوسط حداقل، حداکثر و میانگین SMDI سالیانه را برای دوره پایه و آتی در طی ۳۳ هفته دوره رشد گیاه تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. با توجه به جدول، می‌توان بیان نمود که میانگین SMDI سالیانه در دوره

جدول (۱۱) مقادیر متوسط حداقل، حداکثر و میانگین SMDI سالیانه را در دوره پایه و آتی برای شش مدل GCM و دو

مربوط به مدل‌های GFDL و MIROC برای سناریو ۴/۵ و مدل‌های CSIRO-Mk3.6 و MIROC برای سناریو ۸/۵ می‌باشد.

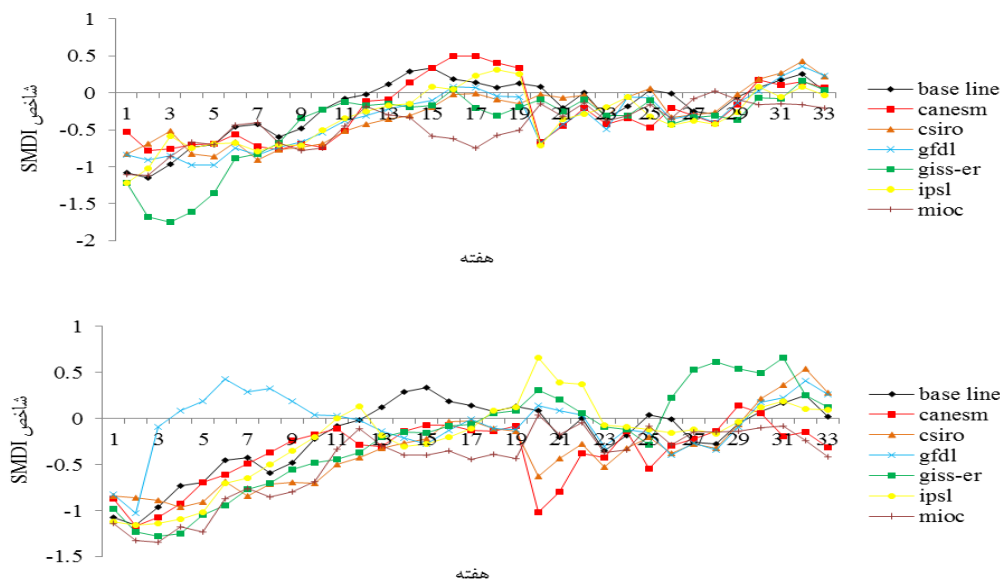
توسط هر شش مدل در محدوده وضعیت نرمال می‌باشد. همچنین بیشترین و کمترین مقادیر میانگین SMDI سالیانه نیز به ترتیب

جدول ۱۱- مقادیر متوسط SMDI سالیانه برای شش مدل GCM تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

سناریوهای انتشار						مدل
RCP8.5			RCP4.5			
میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	
-۰/۳۰۹	۳/۷۶۵	-۳/۷۵۸	۰/۰۷۸	۳/۳۲۸	-۳/۴۳۳	Canesm2
۰/۲۶۰	۳/۷۸۲	-۳/۸۲۴	۰/۲۳۰	۳/۶۶۸	-۳/۵۴۷	GFDL
-۰/۴۱۶	۳/۶۷۳	-۳/۵۱۲	-۰/۲۰۴	۳/۶۸۳	-۳/۷۴۷	MIROC
۰/۰۹۸	۳/۴۹۵	-۳/۵۹۵	-۰/۰۲۶	۳/۵۷۶	-۳/۵۰۸	IPSL
-۰/۲۸۳	۳/۶۷۸	-۳/۸۱۸	۰/۲۲۰	۳/۸۷۴	-۳/۷۵۶	Csiromk-3.6
۰/۱۲۱	۳/۴۶۵	-۳/۰۸۱	۰/۰۴۱	۲/۷۱۰	-۳/۷۴۳	GISS-ES-R
-۰/۰۴۹	۳/۸۴۲	-۳/۹۵۳	-۰/۰۴۹	۳/۸۴۲	-۳/۹۵۳	baseline

کمتری را نسبت به دوره پایه برآورد کرده‌اند، با این وجود سناریو ۴/۵ در مقایسه با سناریو ۸/۵، خشکسالی ناشی از کمبود رطوبت خاک را با شدت بیشتری نشان می‌دهد. از طرفی به منظور مقایسه مدل‌ها در برآورد SMDI هفتگی، برای سناریو ۴/۵ مدل GISS-ES-R و برای سناریو ۸/۵ مدل MIROC شدت خشکسالی را نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر نشان می‌دهند.

شکل (۳) تغییرات زمانی SMDI هفتگی را برای دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در طی دوره رشد گیاه نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در دوره آبی، مقادیر SMDI هفتگی برای اکثر هفته‌ها در طی دوره رشد گیاه، پایین‌تر از خط صفر قرار دارد که بیانگر خشکسالی ناشی از کمبود رطوبت خاک می‌باشد. به منظور مقایسه سناریوها در برآورد SMDI هفتگی، هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ برای اکثر مدل‌ها مقادیر



شکل ۳- تغییرات SMDI هفتگی در دوره پایه و آبی تحت دو سناریو ۴/۵ (بالا) و ۸/۵ (پایین)

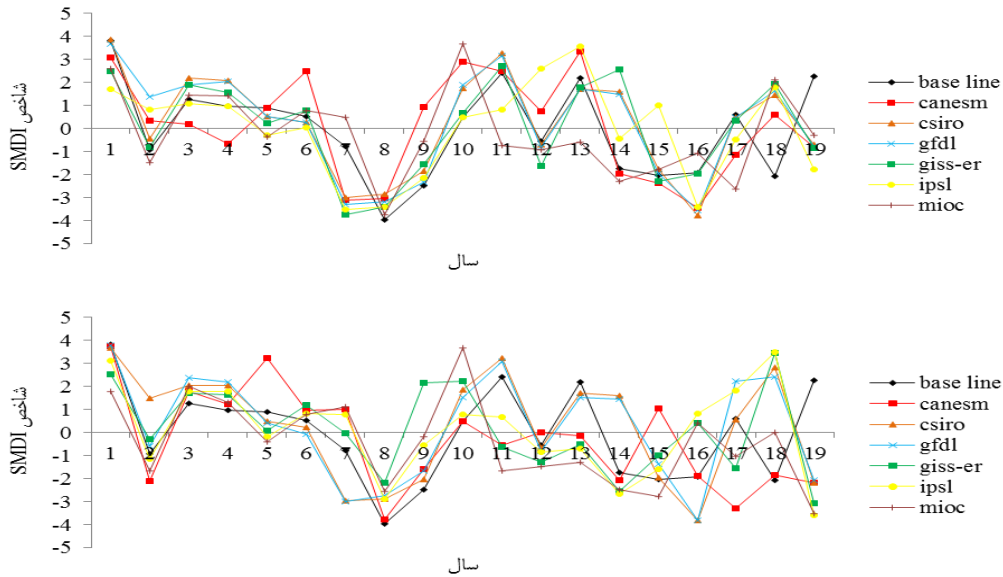
مقادیر بیشتری را نسبت به دوره پایه برآورد کرده‌اند، با این وجود سناریو ۸/۵ در مقایسه با سناریو ۴/۵، خشکسالی ناشی از کمبود رطوبت خاک را با شدت بیشتری نشان می‌دهد.

عدم قطعیت مدل‌های GCM در برآورد شاخص SMDI دامنه تغییرات SMDI هفتگی برای شش مدل GCM تحت دو

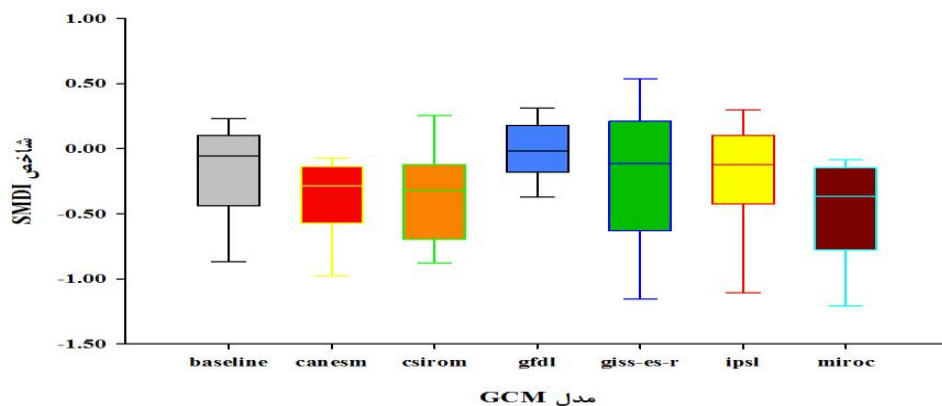
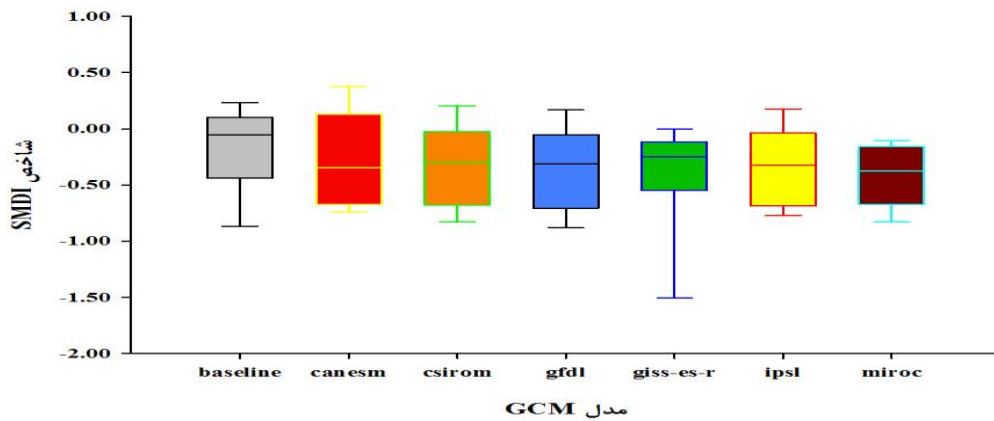
شکل (۴) تغییرات زمانی SMDI سالیانه را برای دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در طی دوره پایه و آبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در طی دوره رشد گیاه، مقادیر SMDI سالیانه برای اکثر سال‌های دوره آبی نسبت به دوره پایه بیشتر می‌باشد. به منظور مقایسه سناریوها در برآورد SMDI سالیانه، هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ برای اکثر مدل‌ها

و مدل کمترین قطعیت ولی تحت سناریو ۸/۵ و مدل‌های GFDL و Canesm2 بیشترین قطعیت و مدل GISS-ER کمترین قطعیت را در برآورد SMDI هفتگی دارند.

سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در شکل (۵) با نمودارهای جعبه‌ای نشان داده شده است. هرچه نمودارهای جعبه‌ای دارای پهنای باند بزرگتری باشند، دارای قطعیت کمتر هستند. به منظور مقایسه مدل‌ها، تحت سناریو ۴/۵ مدل‌های GISS-ER و MIROC بیشترین قطعیت



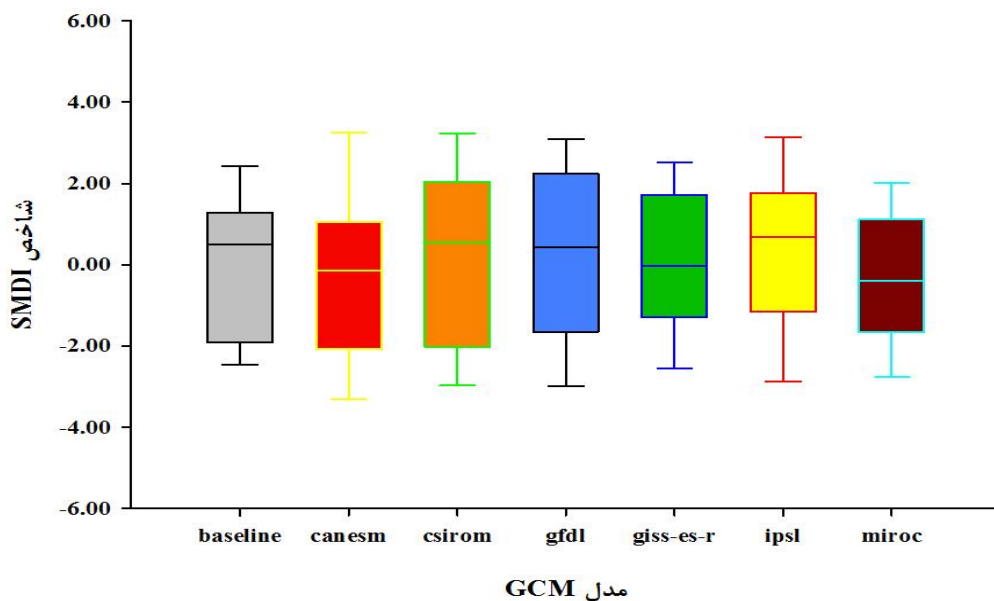
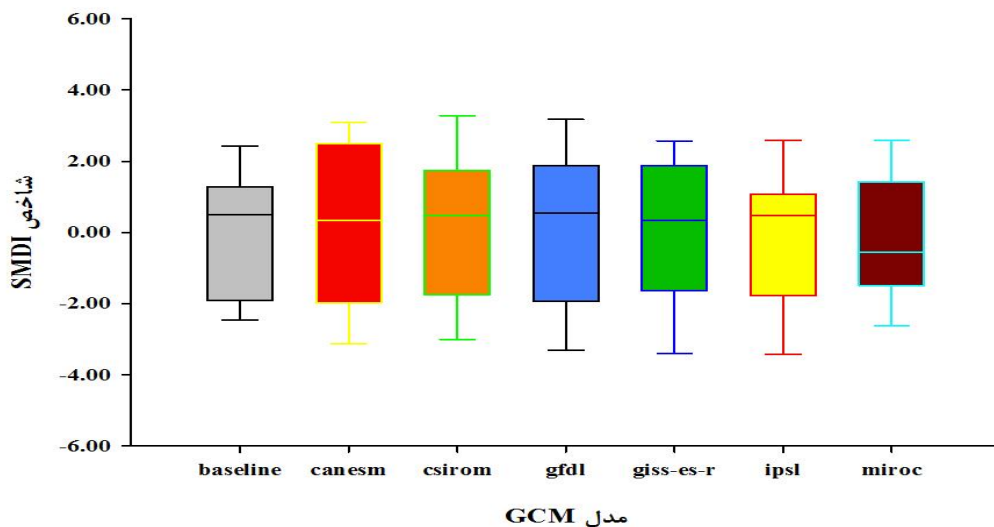
شکل ۴- تغییرات SMDI سالیانه در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ (بالا) و ۸/۵ (پایین)



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای مقادیر متوسط SMDI هفتگی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ (بالا) و ۸/۵ (پایین)

MIROC بیشترین قطعیت و مدل‌های GFDL و Csiromk-3.6 کمترین قطعیت را در برآورد SMDI سالیانه دارند. بنابراین می‌توان بیان داشت که از بین مدل‌ها به مدل MIROC می‌توان بیشتر اعتماد نمود.

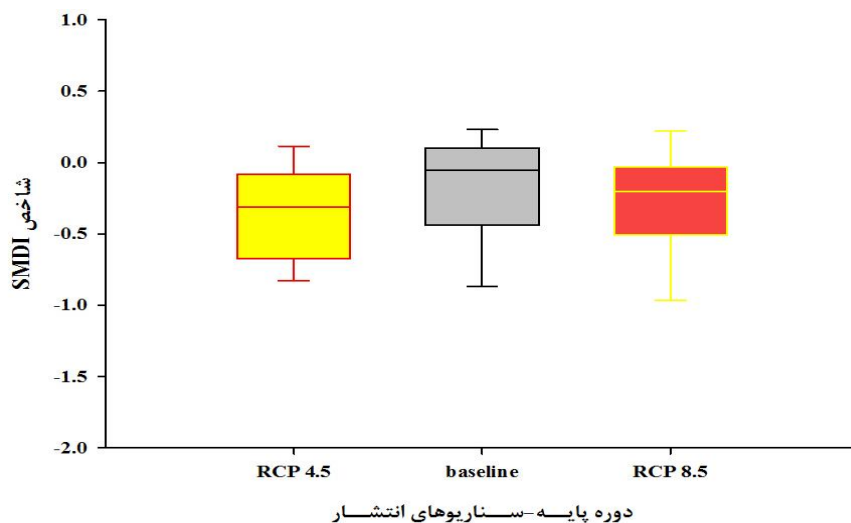
دامنه تغییرات SMDI سالیانه برای شش مدل GCM تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در شکل (۶) نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه مدل‌ها، تحت سناریو ۴/۵ مدل‌های IPSL و MIROC به دلیل کوچک بودن باند جعبه‌ای دارای بیشترین قطعیت و مدل Canesm2 کمترین قطعیت را دارند ولی تحت سناریو ۸/۵ مدل



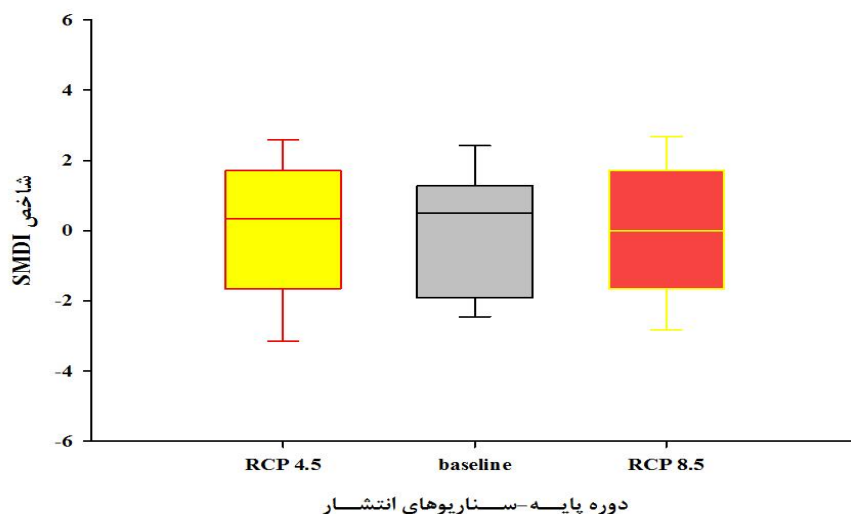
شکل ۶- نمودار جعبه‌ای مقادیر متوسط SMDI سالیانه در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ (بالا) و ۸/۵ (پایین)

را نسبت به دوره پایه و سناریو ۴/۵ کمتر برآورد می‌کند. شکل (۸) دامنه تغییرات SMDI سالیانه را تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. به‌دلیل یکسان بودن ضخامت باند دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ با دوره پایه، دارای قطعیت مشابه می‌باشند و سناریو ۴/۵، SMDI سالیانه را نسبت به دوره پایه و سناریو ۸/۵ کمتر برآورد می‌کند.

عدم قطعیت سناریوهای انتشار در برآورد شاخص SMDI
برای نشان دادن دامنه تغییرات سناریوهای انتشار ۴/۵ و ۸/۵ در برآورد شاخص SMDI از شش مدل GCM استفاده شد. شکل (۷) دامنه تغییرات SMDI هفتگی را تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ نشان می‌دهد. در این شکل، قطعیت سناریو ۸/۵ نسبت به سناریو ۴/۵ و دوره پایه بیشتر است. از طرفی سناریو ۸/۵، SMDI هفتگی



شکل ۷- نمودار جعبه‌ای مقادیر متوسط SMDI هفتگی در طی دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵



شکل ۸- نمودار جعبه‌ای مقادیر متوسط SMDI سالیانه در طی دوره پایه و آتی تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای تولید داده‌های رطوبت خاک در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۱-۱۹۹۲) از شش مدل GCM تحت تاثیر دو سناریو انتشار ۴/۵ و ۸/۵ استفاده شد. به منظور ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی روزانه، از مدل LARS-WG استفاده شد و پارامترهای اقلیمی برای دوره آتی برآورد گردید. در نهایت توسط مدل SWAP، مقادیر رطوبت در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک شبیه‌سازی شد و خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در دوره آتی تعیین شد و با دوره پایه مقایسه گردید.

نتایج تغییرات پارامترهای اقلیمی نشان داد، دمای مینیمم، ماکزیمم و بارش برای مدل‌های GCM در دوره آتی نسبت به

دوره پایه افزایش یافته است. در مقایسه سناریوها، سناریوی ۸/۵ نسبت به ۴/۵، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان داد.

با توجه به نتایج بدست آمده از بررسی شاخص SMDI ملاحظه می‌شود که میانگین SMDI سالیانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه برای هر دو سناریوی ۴/۵ و ۸/۵ افزایش می‌یابد. همچنین به منظور مقایسه سناریوها در برآورد SMDI سالیانه، سناریوی ۴/۵ مقادیر بیشتری را نسبت به سناریوی ۸/۵ نشان می‌دهد. از طرفی مقادیر میانگین SMDI سالیانه برای دوره پایه و آتی، نشان دهنده وضعیت نرمال بوده در صورتی که مقادیر حداقل آن، خشکسالی شدید را نشان می‌دهند.

نتایج قطعی مدل‌های GCM نشان داد، تحت سناریو ۴/۵

سالیانه را نسبت به دوره پایه و سناریو ۸/۵ کمتر برآورد می‌کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از پشتیبانی دانشگاه بیرجند از این تحقیق که در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۱۳۹۷/د/۸۷۵ مورخ ۱۳۹۷/۱/۲۶ انجام شده است، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

REFERENCES

- Babaeian, E., Nagafineik, Z., Zabolabasi, F., Habeibe, M., Adab, H. and Malbisei, S. (2009). Climate change assessment over Iran during 2010-2039 by using statistical downscaling of ECHO-G model. *Geography And Development Iranian Journal*, 7(16), 135-152. (In Farsi)
- Chunping, T., Jianping, Y. and Man, L. (2015). Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui autonomous region, China. *Journal of Atmosphere*, 6, 1399-1421.
- Dubrovsky, M., Svoboda, M.D., Trnka, M., Hayes, M.J., Wilhite, D.A., Zalud, Z. and Hlavinka, P. (2009). Application of relative drought indices in assessing climate change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2), 155-171.
- Ghorbani Aghdam, M., Dinpazhuh, Y., Fakheri Fard, A. and Darbandi, S. (2012). Regionalization of Urmia lake basin from the view of drought using factor analysis. *Journal of Water and Soil*, 26(5), 1268-1276. (In Farsi)
- Hosseinzadeh, J., Tongo, A., Najafifar, A. and Hosseini, A. (2018). Relationship between soil moisture changes and climatic indices in the Mele-Siah forest site of Ilam province. *Journal of Water and Soil*, 32(4), 821-830. (In Farsi)
- Jalali, L., Bazrafshan, J. and Tavakoli, A.R. (2013). Evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) for agricultural drought monitoring (the case study: Maragheh). *1th National Congress on Agricultural Science*, Aug 2013., Payame noor University of Technology, Naghade, Iran. (In Farsi)
- Khadempour, F., Khozaymehnezhad, H. and Amirabadizadeh, M. (2019). Investigating the effects of climate change on daily evapotranspiration in models with different mathematical structures in various climates of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33.1(1), 149-162. (In Farsi)
- Keshavarz, M.R., Vazifedoust, M. and Alizadeh, A. (2011). Development of soil wetness deficit index (SWDI) using MODIS satellite data. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 4(3), 465-477. (In Farsi)
- Lalehzari, R., Yaghoobzadeh, M. and Haghayeghi Moghaddam, S.A. (2017). Evaluation of climate change effect on soil moisture of farms by SWAP and AOGCM models. *Journal of Water and Soil Science*, 27(1), 95-106. (In Farsi)
- Narasimhan, B. and Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 69-88.
- Palmer, W.C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21, 156-161.
- Pirnia, A., Golshan, M., Bigonah, S. and Solaimani, K. (2018). Investigating the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(1), 215-228. (In Farsi)
- Ramezani Etedali, H., Liaghat, A.M. and Parsinejad, M. (2012). Status of agricultural droughts based on soil moisture in Qazvin. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1), 83-93. (In Farsi)
- Sayari, N., Bannayan, M., Alizadeh, A. and Farid, A. (2013). Using drought indices to assess climate change impacts on drought conditions in the northeast of Iran (case study: Kashafrood basin). *Meteorological Applications*, 20(1), 115-127.
- Semenov, M.A. (2008). Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(33), 343-350.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J. and Midgley, P.M. (2013). Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Climate change*.
- Vicente-Serrano, S.M., Miralles, D.G., Domínguez-Castro, F., Azorin-Molina, C., El Kenawy, A., McVicar, T.R., Tomás-Burguera, M., Beguería, S., Maneta, M. and Peña-Gallardo, M. (2018). Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate*, 31(14), 5371-5393.
- Yaghoobzadeh, M. (2015). The simulation of evapotranspiration and moisture soil for agricultural drought evaluation in the base line and future by using remote sensing. Ph. D. dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz. (In Farsi)
- Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., Ramezani, Y. and Pourreza-bilondi, M. (2017). The investigation

of uncertainty emissions scenarios of climate change in soil moisture estimation during the growing season of wheat. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(4), 586-596. (In Farsi)
Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., Ramezani, Y.

and Pourreza-bilondi, M. (2018). An uncertainty analysis of general circulation models for estimation of soil moisture affected by climate change. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 1109-1119. (In Farsi)